

o. PROF. DR.-ING. KARL KORDINA - TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
Lehrstuhl für Stahlbeton- und Massivbau · Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

Untersuchung des Einflusses von Erschütterungen auf
die Festigkeit von Kiesbeton und auf den Verbund von
Bewehrungsstahl und Beton

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Dipl.-Phys. K. Paulmann

Dr.-Ing. J. Steinert

18. 10. 1978

Die Untersuchungen wurden durchgeführt mit Unterstützung
des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und
Städtebau,

Az.: B II 5 - 80 OI 75 - 44

1. Einleitung und Zielsetzung

Stahlbeton-Bauteile müssen häufig während der Einwirkung von dynamischen Beanspruchungen hergestellt werden. Das ist zum Beispiel der Fall bei der Verbesserung von Verkehrsbauten, wenn der Fahrverkehr nicht auf beiden Fahrspuren zugleich unterbrochen werden kann, beim Betonieren von Brücken-Überbauten auf schwingenden Lehrgerüsten oder bei der Errichtung von Neubauten, die unvermeidbaren Verkehrserschütterungen ausgesetzt sind oder auf Baugrund errichtet werden, der durch Gewinnspaltungen in benachbarten Steinbrüchen erschüttert wird. In allen diesen Fällen interessiert die Frage, inwieweit sich diese dynamischen Einwirkungen auf das Gefüge des jungen Betons und den Verbund zwischen Stahl und Beton schädlich auswirken.

Nach DIN 1045, Abschnitt 10.3: Nachbehandeln des Betons, muß der Beton während der ersten Zeit des Erhärtens gegen schädliche Einflüsse geschützt werden, z.B. "gegen Schwingungen und Erschütterungen, sofern diese das Betongefüge lockern und die Verbundwirkung zwischen Bewehrung und Beton gefährden können". In der Literatur finden sich aber widerspruchsvolle Angaben über den Einfluß von Erschütterungen auf jungen Beton bezüglich seiner späteren Festigkeit, vgl. /1/. Deshalb sind vor einigen Jahren im Zusammenhang mit Brückenbauten einige einfache Untersuchungen des Einflusses von Erschütterungen auf Beton durchgeführt worden /1/2/, deren Ergebnisse eine nennenswerte Festigkeitsminderung nicht erbracht haben. Bei diesen Untersuchungen wurden die verwendeten Prüfkörper (Gütewürfel oder Biegebalken) in starren, auf der Fahrbahn aufgelagerten Formen zwar den Erschütterungen mit zum Teil unbekannter Stärke ausgesetzt, der Beton hierbei jedoch nicht biegebeansprucht, sondern nur vertikal gestaucht, also verdichtet.

In früheren im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig durchgeführten Untersuchungen /3/4/ mit dem Hauptziel, die Haftung zwischen altem und jungem Beton zu studieren, wurden dagegen schwach bewehrte Betonbalken während des Erstarrungsvorgangs einer schwingenden Biegebeanspruchung ausgesetzt. Als Kriterium für eine Schädigung wurde die Veränderung der üblicherweise gemessenen Betonfestigkeiten entlang der Balkenachse geprüft.

Es zeigte sich, daß dynamische Beanspruchungen $\epsilon < 0,20$ o/o keinen nachweisbaren Einfluß hatten, während eine Beanspruchung mit $\epsilon \sim 0,37$ o/o sowohl das Betongefüge als auch den Verbund schwer schädigte.

Das Ziel der nachfolgend beschriebenen Versuche war es daher, den Einfluß einer anfänglichen dynamischen Beanspruchung auf die späteren Eigenschaften

- des reinen Betons (Risse, Druck- und Biegezugfestigkeit) und
- des Verbundes zwischen Stahl und Beton (Verbundspannung

experimentell klar zu trennen. Insbesondere sollte

- die kritische dynamische Dehnung des unbewehrten jungen Betons und
- die für den späteren Verbund noch unschädliche dynamische Bewegungsamplitude der Bewehrung im Frischbeton, parallel bzw. senkrecht zur Richtung der Bewehrungsführung,

genauer eingegrenzt werden.

2. Überblick über das Versuchsprogramm

2.1. Verbunduntersuchungen

(Zur Erläuterung: im Folgenden soll unter "Verbund" jeder Kraftschluß zwischen Stahl und Beton verstanden werden, auch wenn kein "Haftverbund" = Formschluß vorliegt!)

Es wurden 54 kleinformatische Prüfkörper mit je einem einzelnen mittig einbetonierten Rippenstahl hergestellt. Während der Betonerhärtung wurde der Stahl im umgebenden Beton periodisch mit Amplituden von 0,03 mm bis 0,3 mm bewegt; außerdem wurden Frequenz, Einwirkungsdauer und Richtung (parallel oder senkrecht zur Längsachse des Stahles) dieser Bewegung variiert. Die Qualität des entstandenen Verbundes wurde anhand der bei Ausziehversuchen gemessenen Ausziehungskraft-Schlupf-Kurven beurteilt.

Die detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung und der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 3.

2.2. Untersuchungen am unbewehrten Beton

Bei den Betonuntersuchungen wurde das frühere Versuchskonzept (/3/4/) - schwingend biegebeanspruchte schlanke Balken - im Prinzip beibehalten. Es ermöglicht eine dynamische Beanspruchung, die von der Balkenmitte (=Krafteinleitung) zu den Auflagern linear abnimmt, und erscheint dadurch zur Ermittlung von Grenzwerten, z.B. für die zulässige Dehnung der Randfaser, besonders geeignet. Kritische Schnittgrößen können allerdings nicht bestimmt werden, solange eine pastöse Konsistenz vorliegt bzw. ein Elastizitätsmodul noch nicht angebbar ist.

Insgesamt wurden sechs unbewehrte Balken gleicher Betonrezeptur hergestellt und während der ersten 24 Stunden zu Biegeschwingungen jeweils konstanter Frequenz und Amplitude angeregt. Später wurden aus der am stärksten beanspruchten Balkenoberseite und entsprechend aus der Betonieroberseite unbeanspruchter, aber sonst gleich behandelter Gütewürfel Probekörper für Druck- und Biegezugfestigkeit herausgeschnitten und geprüft. Einzelheiten der Versuchsdurchführung und Ergebnisse werden in Abschnitt 4 mitgeteilt.

2.3. Untersuchung an bewehrten Balken

An zwei bewehrten Balken wurde geprüft, ob evtl. Auswirkungen einer anfänglichen Biegeschwingbeanspruchung auf das spätere Trag- und Verformungsverhalten eines realen Bauteils auf die Einzelergebnisse aus den Untersuchungen des Verbundes bzw. des unbewehrten Betons zurückgeführt werden können.

Wegen weitgehender Übereinstimmung in der Durchführung - entsprechend Abschn. 2.2. - sind auch diese Versuche im Abschnitt 4 beschrieben.

3. Verbunduntersuchungen

3.1. Übersicht

Zur Untersuchung des Einflusses einer Bewegung des Bewehrungsstahles im jungen Beton auf den entstehenden Verbund wurden insgesamt 54 Ausziehversuche mit Rippentorstählen BSt 420/500 RK durchgeführt. Um die Resultate direkt auf Bauteilquerschnitte anwenden zu können, war die Verbundlänge begrenzt ($l_v = 36 \text{ mm}$).

Die Stähle wurden in würfelförmige Probekörper von 20 cm Kantenlänge mittig stehend einbetoniert und während der Erhärtung des ruhenden Betons periodisch bewegt. Frequenz, Amplitude, Richtung und Dauer dieser Beanspruchung wurden variiert, außerdem wurden mehrere Bezugskörper mit unbeanspruchtem Verbund hergestellt.

Im allgemeinen 24 Stunden nach Mischbeginn wurden die Stähle mit konstanter Geschwindigkeit von ca. 1 mm/min bis zum Verbundbruch ausgezogen, und zwar in Setzrichtung des Betons. Dabei wurde die Zugkraft in Abhängigkeit vom Schlupf des freien Stahlendes aufgezeichnet. Unmittelbar danach erfolgte die Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit des Betons direkt an dem Probekörper, dabei wurde ein evtl. Einfluß des quer zur Druckrichtung liegenden Stahles vernachlässigt.

Der Festlegung eines Prüfalters von nur 24 Stunden waren Versuche vorausgegangen, die die Übertragbarkeit der Resultate auf Beton höheren Alters (28 - 30 Tage) ergeben hatten.

Bei der Mehrzahl der Versuche wurde der Betonstahl in Richtung seiner Achse bewegt; als ein wesentliches Ergebnis wurde festgestellt:

Dauert eine Relativbewegung zwischen Bewehrungsstahl und Beton über den Zeitpunkt des Erstarrungsendes des Zements an oder wird sie erst danach aufgebracht, so bleibt der Stahl später um das Maß dieser Bewegung verschieblich, ohne Kraft aufzunehmen.

Bei Bewegung des Stahls senkrecht zu seiner Achse sind noch andere als die hier untersuchten Parameter maßgeblich; die Möglichkeit einer Verbundschädigung wurde aber auch hier nachgewiesen.

3.2. Einzelheiten der Versuchsdurchführung

3.2.1. Versuchsaufbau

Die Versuchseinrichtung (s. Anlage 1) war so konzipiert, daß die Bewegung des Stahls während der Betonerhärtung - in Achsenrichtung oder senkrecht dazu - und der nachfolgende Ausziehversuch in derselben Anlage ohne Umbau durchgeführt werden konnte.

Eine gußeiserne Form zur Herstellung von 20 cm-Gütekubwürfeln wurde mit Hilfe eines stabilen Gestells aus Winkelprofilen fest mit dem Prüfzylinder einer servo-hydraulischen Prüfanlage (Carl Schenck AG, Darmstadt) verbunden.

Der einzubetonierende Stahl - BSt 42/50 RK, $d_e = 12$ mm, Länge ca. 45 cm - ragte senkrecht durch ein in den Boden der Form gebohrtes Loch und konnte, je nach beabsichtigter Beanspruchungsrichtung, fest oder um eine horizontale Achse drehbar an der Kolbenstange der Prüfanlage befestigt werden.

Zur Begrenzung der Verbundlänge auf $l_v = 36$ mm ($= 3 \cdot d_e$) wurden zwei PVC-Rohre mit 20 mm äußerem \varnothing über den Betonstahl geschoben und mit Klebeband und dauerplastischem Kitt so befestigt, daß das Eindringen von Zementleim in den Zwischenraum sicher verhindert, dem späteren Ausziehen des Stahles aber auch kein nennenswerter Widerstand entgegengesetzt wurde. Mit dem gleichen Kitt wurde auch die Bohrung im Boden der Form abgedichtet.

Zur Bewegung des Stahles in Achsenrichtung wurde der o.g. Hydraulikzylinder in Betrieb genommen; die Bewegung senkrecht zur Achsenrichtung erfolgte durch Ankopplung eines zweiten, waagrecht liegend angeordneten Hydraulikzylinders an das oben aus der Würfelform herausragende Ende des Betonstahles, der dabei eine Drehbewegung um den unteren Einspannpunkt ausführte.

In beiden Fällen wurde die tatsächliche Bewegungsamplitude des Stahles gemessen, und zwar bei der am häufigsten verwendeten Frequenz von 3 Hz mit einer Meßuhr, bei höheren Frequenzen mittels induktivem Wegtaster, Meßbrücke und Oszilloskop.

Die Ausziehversuche wurden mit dem erstgenannten, senkrecht stehenden Prüfzylinder gefahren, und zwar bei den Prüfungen im Betonalter von 24 Stunden ohne vorheriges Ausschalen des Prüflings. Die Messung der Zugkraft erfolgte mit der in die Kolbenstange eingebauten Kraftmeßdose, die Schlupfmessung am freien Stahlende mit einem, an der Würfelform mit Magnetstativ befestigten, induktiven

Wegtaster. Beide Signale wurden einem Koordinatenschreiber zugeführt, es wurde also direkt die Verbundkraft als Funktion des Gleitweges registriert (siehe Anlage 8).

3.2.2. Beton

Ausführliche Angaben zur Betonrezeptur enthält Anlage 2. Wegen der geringen jeweils benötigten Menge (8 l) wurde der Beton von Hand gemischt. Die Beurteilung der Konsistenz erfolgte i.a. nach Augenschein, bei etwa jedem vierten Versuch wurde die Einhaltung des vorgegebenen Ausbreitmaßes $a = 36...39$ cm kontrolliert, ohne daß nennenswerte Abweichungen festgestellt worden wären.

Um einen Beton zu erhalten, der nach 24 Stunden schon einen möglichst hohen Teil seiner Endfestigkeit erreicht hatte, wurde anfangs ein PZ 450 F verwendet. Bei der ersten Lieferung hatte es sich offenbar um einen "Ausreißer" gehandelt, denn mit späteren Lieferungen des gleichen Zementwerkes konnten unter sonst gleichen Bedingungen nur wesentlich niedrigere Festigkeiten erreicht werden. Da allzu große Variationen von β_w über den Versuchszeitraum, aber auch eine Änderung der Betonrezeptur vermieden werden sollten, mußte in der Folgezeit PZ 550 verwendet werden.

Bei 8 der insgesamt 10 Anschlußversuche, bei denen die Prüfung nach 28 Tagen erfolgen sollte, wurde abweichend vom oben gesagten ein PZ 350 F verarbeitet, um die Streckgrenze der Betonstähle beim Ausziehversuch nicht zu überschreiten.

I.a. wurde der Beton durch Stochern verdichtet, und zwar immer durch die gleiche Person. Die dabei erreichte Reproduzierbarkeit war gut, wohl auf Grund der relativ weichen Konsistenz. Bei einigen Versuchen mit Verdichtung mittels Innenrüttler wurde teils gleichwertiger, teils sogar etwas schlechterer Verbund beobachtet.

3.2.3. Betonstahl

Es wurde ausschließlich Rippentorstahl BSt 42/50 RK des Nenndurchmessers 12 mm verwendet. Auf eine Variation der Profilierung oder des Durchmessers wurde bewußt verzichtet, weil für die wesentlichen Auswirkungen einer Bewegung des Stahls diese Parameter von untergeordneter Bedeutung erscheinen.

3.2.4. Parameter der Verbundbeanspruchung

Die Bewegung des Bewehrungsstahles relativ zum ruhenden Beton erfolgte immer nach einer sinusförmigen Zeitfunktion, deren Amplitude und Frequenz bei jedem Einzelversuch konstant gehalten, aber von Versuch zu Versuch variiert wurden. Weitere Parameter waren die Richtung dieser Bewegung sowie der Beanspruchungszeitraum innerhalb der Erhärtungsphase des Betons.

Nachdem sich bei axialer Beanspruchung die Wegamplitude als hauptsächliche Einflußgröße erwiesen hatte (s.o.), wurde bei der Mehrzahl der Versuche eine Frequenz von 3 Hz gewählt, weil dabei die Kontrolle der Stahlbewegung in besonders einfacher Weise mittels einer Meßuhr erfolgen konnte. Im Hinblick auf die bei den Betonbalken (Abschnitt 4 dieses Berichts) angewendeten Schwingfrequenzen von 8 und 16 Hz wurden jedoch auch Versuche bei höheren Frequenzen (bis 32 Hz) angestellt.

Die Wegamplitude des Betonstahles wurde zwischen $\pm 0,03$ mm und $\pm 0,30$ mm variiert. Die untere Grenze ergab sich aus der Nullpunktsdrift des die Prüfmaschine steuernden Regelverstärkers, die obere aus Abdichtungsschwierigkeiten an der Durchführung des Stahles durch den Boden der Betonierform. Die in der Baupraxis zu erwartenden anfänglichen Relativbewegungen zwischen Bewehrung und Frischbeton sind u.E. mit dem erzielten Variationsbereich erfaßt.

Die Dauer der Beanspruchung betrug minimal 2 Stunden, maximal 6 Stunden innerhalb der ersten 6 Stunden nach Einbringen des Betons (ca. 6 1/4 Stunden nach Mischbeginn).

Die insgesamt 12 Bezugsversuche - ohne Stahlbewegung - wurden etwa gleichmäßig über den Zeitraum der Durchführung des Programms verteilt, um systematische Fehler durch unbeabsichtigte Änderungen der Arbeitsweise (z.B. langsam nachlassende Sorgfalt beim Mischen oder Verdichten) rechtzeitig zu erkennen.

Eine Übersicht über das Versuchsprogramm gibt die nachfolgende Tabelle 1.

Tabelle 1 siehe Blatt 8

Tabelle 1: Übersicht über die Verbundversuche

Beanspruchung des Verbundes		Prüfung nach 24 Stunden			Prüfung nach 28 - 30 Tagen		
Richtung	Amplitude	Anzahl	Beanspr.- Zeit ab Betonier- ende	Frequenz	Anzahl	Beanspr. Zeit ab Betonier- ende	Frequenz
	mm		h	Hz		h	Hz
-	0	6	-	-	6	-	-
axial	0,03	2	0 - 6	3			
	0,05	3	0-4,25/0-6/ 2 - 4	3			
	0,1	13	0-2...0-6/ 2-4/4-6	3	2	0 - 2	3
		4	0 - 2/0 - 6/ 2 - 4/4 - 6	16			
		1	0 - 6	32			
	0,15	1	0 - 6	3			
	0,20	1	0 - 6	3	2	0 - 6	3
	0,25	2	0 - 6	3			
	0,30	2	0 - 6/2 - 4	3			
trans- versal	0,10	5	0 - 4/0 - 6	3			
		2	0 - 4	8			
		2	0 - 4	16			

3.3. Versuchsergebnisse

Bei den 12 Versuchen mit unbeanspruchtem Verbund betrug das Prüfalter 1 bzw. 28 Tage, die Würfeldruckfestigkeit variierte zwischen $\beta_w = 13,4 \text{ N/mm}^2$ und $\beta_w = 40,4 \text{ N/mm}^2$, die bezogene Rippenfläche ⁺⁾ der Stähle zwischen $f_R = 0,078$ und $f_R = 0,102$ und ihr Durchmesser ⁺⁾ zwischen $d_e = 11,85 \text{ mm}$ und $d_e = 12,25 \text{ mm}$.

Die beste Übereinstimmung zwischen diesen Versuchen ergab sich bei Bezug der Verbundkräfte auf die Würfeldruckfestigkeit und die mittlere im Verbund liegende Stahlmantelfläche. Wurde dagegen auf die bezogene Rippenfläche oder eine andere Potenz von β_w bezogen (z.B. in der Literatur genannt $\tau_v \sim \sqrt[3]{\beta_w^2} / 5$, $\tau_v \sim \sqrt{\beta_w} / 6$), so waren die Streuungen wesentlich größer. Daher wurden auch bei allen anderen Versuchen die bezogenen Verbundspannungen

$$x_v = \frac{P}{\pi d_e l_v \beta_w} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} P &= \text{Verbundkraft} \\ d_e &= \text{Stahldurchmesser} \\ l_v &= \text{Verbundlänge} \\ \beta_w &= \text{Würfeldruckfestigkeit} \end{aligned}$$

ermittelt und der Beurteilung zugrunde gelegt.

3.3.1. Axiale Bewegung des Betonstahls

Wurde der Bewehrungsstahl nur innerhalb der ersten 2 h 40 ' nach Betonierende bewegt, so ergab sich eine Verbundcharakteristik (bezogene Verbundspannung als Funktion des Gleitwegs), die derjenigen eines ungestörten Verbundes ähnlich ist, aber - bei jeweils gleichem Gleitweg - bis zu 100 % höhere Verbundspannungen aufweist (s. Anlage 3)

Eine Verlängerung der Beanspruchungszeit um nur 10 Minuten - also auf 2 h 50 ' ab Betonierende oder länger - führte dazu, daß der Haftverbund irreversibel gestört wurde: der Stahl konnte später im abgebundenen Beton von Hand etwa um den ursprünglichen Bewegungshub verschoben werden.

Rechnet man den Gleitweg Δ von der Stahl-Mittellage aus (Mitte zwischen den beiden Umkehrpunkten der harmonischen Schwingbewegung $w(t) = \hat{w} \cdot \sin 2\pi f t$), so ist die bezogene Verbundspannung im Bereich $\Delta < \hat{w}$ nahezu Null, vergl. Anlage 3.

⁺⁾ bestimmt nach DIN 488 Teil 3

Der kritische Zeitpunkt zwischen 2 h 40 ' und 2 h 50 ' ab Betonierende, d.h. zwischen 2 h 50 ' und 3 h 0 ' ab Mischbeginn, entspricht sehr genau dem nach DIN 1164 bestimmten Zeitpunkt des Erstarrungsendes, der bei dem verwendeten PZ 550 zu 2 h 50 ' ab Mischbeginn ermittelt wurde.

Im Bereich $\Delta > \hat{w}$ hängt die Verbundcharakteristik eines über den Erstarrungszeitpunkt hinaus beanspruchten Verbundes von den Beanspruchungsparametern ab. Einige der gemessenen Verläufe für Schwingamplituden zwischen $\hat{w} = 0,03 \text{ mm}$ und $\hat{w} = 0,3 \text{ mm}$ sind in Anlage 3 aufgetragen. Mit wachsender Amplitude beschränkt sich die Verbesserung gegenüber dem unbeanspruchten Verbund zunächst immer mehr auf das Gebiet des Verbundbruches ($\Delta > 1 \text{ mm}$), für $\hat{w} \geq 0,2 \text{ mm}$ wird der Verbund im gesamten untersuchten Bereich verschlechtert.

Der Einfluß einer derartigen Schwingbeanspruchung auf die Eigenschaften des den Stahl umgebenden Betons (z.B. Steifigkeit der Betonkonsolen) kann aus den üblichen x_v - Δ -Diagrammen - mit logarithmischer Teilung der Abszisse - wegen der Verschiebung der Kurven in Abszissenrichtung nicht unmittelbar entnommen werden. Es sollen daher zwei neue Größen eingeführt werden:

- der vom Kraftschluß zwischen Stahl und Beton ab gerechnete Gleitweg $\delta = \Delta - \hat{w}$ (vgl. Anlage 8 , bei unbeanspruchtem Verbund ist $\delta = \Delta$) und
- der "Verbundbeiwert" $\xi = \xi(\delta)$ als Quotient der bezogenen Verbundspannungen von beanspruchtem und unbeanspruchtem Verbund, genommen beim gleichen Gleitweg δ - dabei wird im vorliegenden Fall immer der arithmetische Mittelwert aus den 5 Bezugsversuchen mit unbeanspruchtem Verbund und durch Stochern verdichtetem Beton verwendet:

$$\xi(\delta) = \frac{x_v}{\bar{x}_v(\hat{w}=0)} \bigg|_{\delta}$$

In Anlage 4 ist für die zwei Gleitwege $\delta = 0,01 \text{ mm}$ und $\delta = 1 \text{ mm}$

- exemplarisch für die Grenzfälle geringer und hoher Verbundbelastung - der Verbundbeiwert ξ als Funktion der Beanspruchungsdauer dargestellt, dabei sind die Parameter Schwingamplitude und -frequenz konstant. Bei geringer Belastung der Betonkonsolen ($\delta = 0,01 \text{ mm}$) zeigt sich wieder der entscheidende Einfluß der Einwirkungsdauer einer Schwingbeanspruchung, während in der Nähe des Verbundbruches ($\delta = 1 \text{ mm}$) eine allgemeine Verbundverbesserung - bei allerdings stark erhöhter Streuung - festzustellen ist.

In Anlage 5 sind die Verbundbeiwerte aller hier durchgeführten Versuche - wieder für die beiden Gleitwege $\delta = 0,01$ mm und $\delta = 1$ mm - eingetragen. Wegen der offensichtlichen Bedeutung des Beanspruchungszeitraumes wurde eine Gruppeneinteilung nach diesem Parameter vorgenommen. Es zeigt sich, daß

- eine axiale Schwingbewegung der Bewehrung während der Betonerhärtung zu einer stark vergrößerten Streuung der Verbundbeiwerte führt,
- der Einfluß der Beanspruchungsparameter Zeit, Amplitude und Frequenz bei kleinen Gleitwegen deutlicher ausgeprägt ist,
- eine Schwingbeanspruchung vor dem Zeitpunkt des Erstarrungsendes das Verbundverhalten insgesamt verbessert,
- eine den Erstarrungszeitpunkt überdeckende bzw. erst danach einsetzende Schwingbeanspruchung den Beton mehr bzw. weniger ausgeprägt schädigt,
- bei sofort einsetzender und über den Erstarrungszeitpunkt andauernder Beanspruchung eine teilweise Kompensation der verbessernden und schädigenden Einflüsse auftritt (wobei allerdings der Haftverbund verloren geht),
- Vergrößerung der Schwingamplitude zu stärkerer Schädigung führt,
- höhere Schwingfrequenzen tendenziell weniger schädlich sind als niedrige.

Diese Änderungen der Betoneigenschaften in der Verbundzone sind am älteren Beton (28 Tage) genauso nachzuweisen wie nach 24 Stunden, vgl. Anlage 6, d.h. eine Ausheilung, wie sie z.B. in Analogie zum Verschluß von feuchtgehaltenen Mikrorissen für möglich gehalten wurde, findet nicht statt.

3.3.2. Transversale Bewegung des Betonstahls

Es waren Versuche mit 6stündiger Beanspruchung (ab Betonierende) und einer Schwingamplitude $\hat{w} = 0,10$ mm beabsichtigt. Bei einigen Versuchen trat nach etwa 4 Stunden eine Fixierung des Stahles in der Verbundzone ein, so daß die Amplitude nicht aufrecht erhalten werden konnte und die Beanspruchung abgebrochen wurde. In 6 Fällen - darunter alle 4 Versuche mit Schwingfrequenzen von 3 Hz - mit 4-stündiger Beanspruchung wurde beim Ausziehversuch ein einwandfreier Haftverbund mit ungewöhnlich hohen Verbundspannungen bei kleinen Gleitwegen festgestellt. In Anlage 7 sind der Wertebereich aller 10 Versuche im X_V - Δ -Diagramm sowie die Verbundbeiwerte bei den zwei Gleitwegen $\delta = 1$ mm

und $\delta = 0,01$ mm dargestellt. Auch hier fällt, wie bei axialer Stahlbewegung, die gegenüber einem ungestörten Verbund wesentlich größere Streuung, die verminderte Beeinflussung im Bereich nahe dem Verbundbruch sowie die vergleichsweise günstigere Wirkung höherer Schwingfrequenzen auf. Darüber hinaus deutet sich aber auch ein Einfluß der Betonkonsistenz an, der bei den Versuchen mit axialer Bewegung nicht festgestellt wurde.

Insgesamt sind zur Klärung der Verbundbeeinflussung durch Stahlbewegungen senkrecht zur Achsenrichtung, insbesondere im Hinblick auf baupraktische Gegebenheiten - aus dem Beton ragende Bewehrungsstähe am Ende eines Betonierabschnittes, z.B. bei der Gleitschalungsbauweise -, Versuche an entsprechenden Bauteilausschnitten erforderlich.

4. Balkenversuche

4.1. Übersicht

Die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Verbunduntersuchungen allein erlauben noch keine Schlüsse auf das Verhalten eines realen Bauteils, das während der Betonerhärtung einer Erschütterungsbeanspruchung ausgesetzt war. Insbesondere ist noch der Einfluß einer periodischen Biegebeanspruchung auf die Eigenschaften des Betons außerhalb etwaiger Verbundzonen zu klären. Außerdem ist nicht von vorneherein abzusehen, wie sich ein z.B. in der Biegezugzone eines Balkens angeordneter Längsbewehrungsstab bei einer unmittelbar nach dem Betonieren einsetzenden Biegeschwingbeanspruchung des Balkens verhält: Im noch plastischen Beton wird der Stahl eine von der Balkenmitte zu den Auflagern zunehmende, axiale Schiebebewegung relativ zum umgebenden Beton ausführen, ggfs. können auch abschnittsweise - zwischen zwei Bügeln - Transversalschwingungen angeregt werden. Bei fortschreitender Betonerhärtung erscheint es denkbar, daß sich, von der Balkenmitte ausgehend, ein Verbund entwickelt, der ausreichend ist, die Betondehnungen auf den Stahl zu übertragen und die Relativbewegung zwischen Stahl und Beton zu beenden - evtl. rechtzeitig vor dem kritischen Zeitpunkt des Erstarrungsendes, so daß keine bleibende Verbundschädigung eintritt.

Zur Klärung dieser Fragen wurden insgesamt 8 Balkenversuche durchgeführt:

- 6 unbewehrte Balken wurden i.a. während der ersten 24 Stunden nach dem Betonieren zu Biegeschwingungen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz angeregt. Im Alter von 28 Tagen wurde an Probekörpern, die aus der am stärksten beanspruchten Balkenoberseite herausgesägt waren, der Verlauf von Würfeldruck- und Biegezugfestigkeit längs der Balkenachse ermittelt.

Bei allen Balken entstanden nach etwa 4 Stunden Querrisse in einer, je nach Höhe der Schwingamplitude verschieden breiten, Umgebung der Balkenmitte. Damit ging dort die Biegeschwingbeanspruchung in eine Nachverdichtung über.⁺⁾

Eine bei allen Balken gleichartige Ortsabhängigkeit der geprüften Betoneigenschaften wurde nicht festgestellt.

Die minimale Bruchdehnung jungen Betons bei dynamischer Beanspruchung ist im Rahmen der hier erzielbaren Genauigkeit gleich derjenigen bei statischer Beanspruchung /7/.

- von 2 bewehrten Balken (Längsbewehrung in den Ecken des Querschnitts sowie minimale Verbügelung, siehe Anlage 11) wurde der eine nach dem Betonieren "vorschriftsmäßig", d.h. vor Erschütterungen geschützt gelagert, während der andere einer 8-stündigen Schwingbeanspruchung unterzogen wurde. Die anfängliche periodische Längsbewegung der freien Stahlfenden blieb während dieser Zeit nahezu unvermindert, die o.g. Verbundentwicklung von der Balkenmitte her trat also nicht ein.

Im Alter von etwa 28 Tagen wurden beide Balken durch eine mittige Einzel-last bis zur Tragfähigkeitsgrenze belastet. Messungen von Durchbiegung, Stahldehnung und -schlupf zeigten weitgehende Übereinstimmung im Tragverhalten, obgleich bei dem schwingbeanspruchten Balken große Gleitwege der freien Enden der Längsbewehrung auftraten. Es erscheint sicher, daß bei stark außermittiger Belastung ein Verbundbruch am lastnahen Auflager eingetreten wäre; eine entsprechende Wiederholung des Versuches muß aus Zeit- und Kosten-gründen ggfs. einem weiterführenden Forschungsvorhaben vorbehalten bleiben.

⁺⁾ Nach /8/ führt eine kurzzeitige Nachverdichtung mit vergleichbaren Schwingamplituden, allerdings wesentlich höherer Schwingfrequenz (Rütteltisch), im Betonalter von einer Stunde zu einer Minderung der Druckfestigkeit um 10 ... 12 %, bei 3 ... 6 Stunden altem Beton dagegen zu einer Erhöhung um 10 ... 25 %.

Um die frisch betonierten, 3,50 m langen Balken auf Biegung beanspruchen zu können, mußte eine entsprechend steife Schalung verwendet werden. Als Schalungsboden diente daher ein Stahlrohr mit quadratischem Querschnitt, das so bemessen war, daß mit der vorhandenen Belastungseinrichtung die gewünschten Schwingamplituden erreicht werden konnten, die Eigenfrequenz der mit frischem Beton gefüllten Schalung aber deutlich über der höchsten vorgesehenen Schwingfrequenz von 16 Hz lag. Dadurch sollte eine resonanznahe Anregung des Systems - mit negativen Auswirkungen auf die Konstanz von Amplitude und Biegelinie - zu jedem Zeitpunkt des Versuchs mit Sicherheit vermieden werden.

Die Schwingungsanregung erfolgte mit einem in Balkenmitte am Schalungsboden angreifenden servohydraulischen Prüfzylinder bei gelenkiger Lagerung beider Enden der Schalung. Hub und Arbeitsfrequenz des Hydraulikzylinders konnten im hier interessierenden Rahmen frei gewählt und zeitlich konstant gehalten werden.

Nach der Schwingbeanspruchung wurden alle Balken sowie ggfs. die zu Vergleichszwecken hergestellten, unbeanspruchten Probewürfel einige Tage unter feuchten Tüchern und dann in einem Klimaraum im Normalklima gelagert. Die Sägearbeiten an den unbewehrten Balken erfolgten im Alter von 3 Wochen, die Festigkeitsprüfungen und die Prüfung der bewehrten Balken i.a. nach 28 Tagen.

An den Schnittflächen der unbewehrten Balken wurde die Gleichmäßigkeit des Betongefüges nach Augenschein beurteilt. Entmischungen wurden nicht festgestellt, bei den am stärksten beanspruchten Balken war in Balkenmitte der Gehalt an Luftporen vergrößert und die Haftung des Zementsteins am Grobzuschlag sowie die Bindung des Feinsandes geringfügig verschlechtert.

Entsprechende Gefügeveränderungen, allerdings in wesentlich deutlicher Ausprägung, waren auch an dem am stärksten beanspruchten Balken des früheren Forschungsvorhabens /4/ festgestellt worden.

4.2. Einzelheiten der Versuchsdurchführung

4.2.1. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Anlage 9 dargestellt. Die - einzeln betonierten - unbewehrten Balken hatten Abmessungen von $3,50 \times 0,20 \times 0,20 \text{ m}^3$ bei einer Stützweite der Schalung von 3,20 m. Bei den beiden bewehrten Balken sollte die Verankerungslänge der Bewehrung 10 cm betragen, außerdem sollten beide Balken mit einer Mischerfüllung betoniert werden. Um Auflagerabstand und Höhe

beizubehalten, wurden die Abmessungen auf $3,40 \times 0,15 \times 0,20 \text{ m}^3$ (Länge x Breite x Höhe) reduziert.

Als Schalungsboden und Träger für die Schwingbeanspruchung des frischen Betons diente ein Stahlrohr mit quadratischem Querschnitt ($200 \times 200 \text{ mm}^2$, Wanddicke $6,3 \text{ mm}$), die Schalungswangen aus 22 mm dickem Magnoplan-Schalholz waren bei den Versuchen mit Schwingamplituden $\hat{w} > 0,05 \text{ mm}$ in Abständen von 20 cm geschlitzt, um ein seitliches Aufbiegen der Form bei der Biegebeanspruchung zu vermeiden.

Die Anregung der Form erfolgte im Druckschwellbereich mit einer Unterlast von ca. 10 kN , um ein Kippen auf den Auflagern - als Folge einer evtl. vorhandenen geringen Verwindung des Stahlrohres - zu verhindern. Auf diese Art entstanden schwach gekrümmte Balken, was aber für die weiteren Untersuchungen ohne Belang war.

4.2.2. Beton und Bewehrung

Die Betonrezeptur war bei allen 8 Balken gleich, genaue Angaben sind in Anlage 10 zusammengestellt. Der Beton wurde in die schwingende Schalung eingefüllt und mit einem Innenrüttler verdichtet. Das Einbringen des Betons war ca. 30 Minuten nach Mischbeginn abgeschlossen.

Bei den beiden bewehrten Balken wurden je vier Stähle BSt 420/500 RK mit $d_e = 12 \text{ mm}$ in den Ecken des Querschnitts sowie je 11 Bügel aus BSt 420/500 RK, $d_e = 8 \text{ mm}$, im Abstand von 30 mm angeordnet, siehe Anlage 11.

4.2.3. Schwingbeanspruchung

Die Biegeschwingbeanspruchung erfolgte bei den unbewehrten Balken i.a. während 24 Stunden ab Betonierende, siehe nachstehende Tabelle 2. Bei Balken 1 mußte nach 11 Stunden wegen eines Anrisses in der Belastungskonstruktion die Schwingamplitude um die Hälfte vermindert werden, Balken 3 konnte wegen Ausfalls der Prüfanlage nur $16,5$ Stunden beansprucht werden.

Die vorstehend beschriebenen Verbunduntersuchungen bei axialer Stahlbewegung hatten als kritischen Zeitpunkt für Verbundstörungen die Zeit des Erstarrungsendes des verwendeten Zements ergeben, bei transversaler Stahlbewegung wurde dagegen 4 Stunden nach Mischbeginn noch eine deutliche Verbundverfestigung beobachtet. Die Beanspruchung des einen der zwei bewehrten Balken wurde daher

nicht, wie bei den Verbunduntersuchungen, nach 6 Stunden beendet, sondern vorsichtshalber auf 8 Stunden ab Betonierende ausgedehnt.

Die Querrisse im Beton entstanden zwischen 4 und 10 Stunden nach Mischbeginn. Bei Verwendung der geschlitzten Schalungswangen ging die Rißentwicklung i.a. von diesen Schlitzen aus, die Risse hatten also einen Abstand von ca. 20 cm.

Die Biegelinie der Betonierform wurde durch Abtasten des Schalungsbodens mit einem Schwingbeschleunigungsaufnehmer kontrolliert. Dabei wurden gegenüber der statischen Biegelinie eines Balkens mit konstanter Biegesteifigkeit wie auch gegenüber der bei Anregung der ersten Biegeeigenschwingung zu erwartenden Biegelinie Abweichungen festgestellt, und zwar eine größere Krümmung in Balkenmitte und geringere Krümmungen im Abstand von mehr als ca. 20 cm außerhalb der Mitte.

Zur Abschätzung der Betonranddehnungen am Ort des auflagernächsten Risses (s. Tabelle 2) wurden daher die Balkenkrümmungen aus der tatsächlichen Biegelinie sowie, bei Versuch 5, aus den in drei Querschnitten des Schalungsbodens gemessenen Dehnungen ermittelt.

Die Lage des auflagernächsten Risses ist dadurch bestimmt, daß nach seiner Entstehung und der so erfolgten Entlastung der Rißufer die Bruchdehnung des Betons nirgends mehr überschritten wird. Es kann also nur ein oberer Grenzwert für die kritische Betondehnung ermittelt werden, dessen Genauigkeit mit abnehmender Schwingamplitude größer werden sollte.

Während der Schwingbeanspruchung des bewehrten Balken 7 wurden 1h 45' und 8h 15' nach Mischbeginn (1 h 20' bzw. 7h 50' nach Betonierende) die axialen Bewegungen der freien Enden der Längsbewehrung relativ zur Schalung gemessen, siehe nachfolgende Tabelle 3.

Balken Nr.	1	2	3	4	5	6 ⁺⁾	7	8	Einheit
Bewehrung	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	
Schwingamplitude \hat{w}	3,2/1,6	0,8	0,4	1,0	1,0	0,4	2,5	-	mm
Schwingfrequenz f	8	8	8	16	0,3	8	8	-	Hz
Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit v_{eff}	114/56,9	28,4	14,2	71,1	1,33	14,2	88,9	0	mm/s
Beanspruchungsdauer ab Betonierende	11/24	24	16,5	24	24	24	8	-	h
Abstand des auflagernächsten Risses ab Balkenmitte	120	60	30	90	100	60	75	-	cm
Scheitelwert der Betonranddehnung an der Stelle des auflagernächsten Risses $\epsilon_{\text{bmax}} \approx$	0,19	0,13	0,09	0,11	0,09	0,07	0,34	-	‰

⁺⁾ Wiederholung des wegen Ausfalls der Prüfmaschine vorzeitig beendeten Versuchs Nr. 3

Lage des Bewehrungsstahls	Bewegungshub in mm am freien Ende	
	Betonalter 1 h 45'	Betonalter 8 h 15'
unten	0,38 0,63	0,25 0,51
unten	0,50 0,50	0,26 0,53
oben	1,00 0,95	1,00 0,62
oben	1,05 0,95	1,02 0,64

Tabelle 3: Bewegung der Längsbewehrungsstäbe bei der Schwingbeanspruchung von Balken 7

4.2.4. Prüfung der Druck- und Biegezugfestigkeit

Im Alter von 3 Wochen wurden die unbewehrten Balken nach dem in Anlage 12 skizzierten Schneidplan in Würfel mit 20 cm Kantenlänge zerlegt, soweit nicht schon bei der Schwingbeanspruchung durchgehende Risse entstanden waren; aus den Würfeln einer Balkenhälfte sowie aus zwei Gütewürfeln wurden Probekörper für Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung so herausgeschnitten, daß die am meisten beanspruchte Betonieroberseite erfaßt wurde.

Insgesamt wurden also pro Balken 20 Biegezug-Prismen mit den Abmessungen $20 \times 6,5 \times 6,5 \text{ cm}^3$ und 30 Würfel mit 6,5 cm Kantenlänge für Druckfestigkeitsprüfungen entnommen; auf die entsprechende Prüfung der zweiten Balkenhälfte mußte aus Kostengründen i.a. verzichtet werden.

Nach Durchführung der Sägearbeiten wurden alle Probekörper bis zur Prüfung am 28. Tage wieder im Klimaraum gelagert.

Bei der Prüfung der Biegezugfestigkeit wurde ein Prisma aus jedem Balkenabschnitt an der Betonieroberfläche auf Zug, das andere auf Druck beansprucht. Die 6,5 cm-Würfel zur Druckfestigkeitsermittlung wurden quer zur Balkenlängsachse belastet.

Bei jedem Prüfling wurden die genauen Abmessungen ermittelt, um eine Verfälschung der Festigkeitswerte durch Maßabweichungen beim Sägen auszuschließen.

Die Ergebnisse dieser Prüfungen, insbesondere die i.a. erhebliche Festigkeitsminderung der Balkenausschnitte gegenüber den unbeanspruchten Vergleichskörpern (s. Abschnitt 4.3.2.), gaben Anlaß zu Kontrolluntersuchungen an den beiden bewehrten Balken 7 und 8.

Nach der Prüfung des Tragverhaltens (s.u.) wurden aus der von Biegezug-Rissen freien Umgebung der Auflager beider Balken insgesamt 8 Prismen mit den Abmessungen $15 \times 15 \times 20 \text{ cm}^3$ bzw. $20 \times 20 \times 15 \text{ cm}^3$ herausgeschnitten und im Alter von 24 Wochen auf Druckfestigkeit geprüft.

4.2.5. Ermittlung des Tragverhaltens der bewehrten Balken

Nach Lagerung im Normalklima wurden die bewehrten Balken Nr. 7 und 8 im Alter von 28 bzw. 29 Tagen durch eine mittig aufgebrachte Einzellast bis zum Fließen der Bewehrung belastet. Die Stützweite betrug dabei 3,20 m, wie schon bei der Schwingbeanspruchung des Balkens 7. Die Belastung wurde in Schritten von 2,5 kN erhöht, bei jeder Laststufe wurden die Durchbiegungen in 5 Punkten, die Dehnungen an 12 Stellen der Bewehrung und die Gleitwege der 4 Bewehrungsstäbe an beiden Balkenenden gemessen, siehe Anlage 13.

4.3. Versuchsergebnisse

4.3.1. Dynamische Bruchdehnung jungen Betons

Das Minimum der dynamischen Bruchdehnung unbewehrten jungen Betons, das im Alter von etwa 4 bis 10 Stunden durchlaufen wird, liegt bei $\epsilon \lesssim 0,07 \text{ ‰}$ in guter Übereinstimmung mit den von Weigler und Karl /7/ im zentrischen Zugversuch bei 95 % der Bruchlast gemessenen Werten von $\epsilon = 0,04 \dots 0,07 \text{ ‰}$. Durch eine Bewehrung wird die Rißgefahr bei einer Biegebeanspruchung erwartungsgemäß erheblich vermindert, die Betonranddehnung am Ort des auflagernächsten Risses betrug bei Balken 7 $\epsilon_{\text{bmax}} \lesssim 0,34 \text{ ‰}$, vergl. Tabelle 2.

4.3.2. Betonfestigkeiten

Die Ergebnisse der Druck- und Biegezugfestigkeitsprüfungen an den aus den unbewehrten Balken 1 - 6 herausgeschnittenen Probekörpern sind in Anlage 14 dargestellt. Über der Balkenachse aufgetragen sind jeweils

- die Mittelwerte der Druckfestigkeiten von i.a. 3 Würfeln eines Balkenabschnittes, dividiert durch die gemittelte Druckfestigkeit von 6 unbeanspruchten Würfeln gleicher Abmessungen (herausgeschnitten aus den gleichzeitig mit jedem Balken hergestellten Probewürfeln)
- die Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten von 2 Prismen eines Balkenabschnittes (je 1 Prisma geprüft mit Druck- bzw. Zugspannung an der Betonoberfläche), dividiert durch die mittlere Biegezugfestigkeit von 4 unbeanspruchten Prismen gleicher Abmessungen (aus Probewürfeln).

Es zeigt sich:

- Eine bei allen Balken gleichartige Variation der Festigkeitswerte längs der Balkenachse ist nicht festzustellen. Bei Versuch 5 und 6 treten die größten Festigkeiten etwa bei 1/4 auf, bei Versuch 4 in der Nähe des Auflagers; bei den übrigen Versuchen ist keine die Meßwertstreuungen übersteigende Tendenz zu erkennen. Bei Bezug auf die Festigkeiten am Auflager beträgt

die Änderung der Druckfestigkeit	-44 ... +32 % (Mittel: -5 %),
die Änderung der Biegezugfestigkeit	-22 ... +73 % (Mittel: +4 %),

dagegen ist

- bei Bezug auf die Festigkeiten unbeanspruchter Vergleichskörper der Variationsbereich
- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| der Druckfestigkeit | -54 ... +33 % (Mittel: -18 %), |
| der Biegezugfestigkeit | -50 ... -3 % (Mittel: -24 %). |

Es stellt sich also eine deutliche Abhängigkeit von der Bezugsgröße dar.

- Die mit den höchsten Schwinggeschwindigkeiten beanspruchten Balken 1 und 4 (vergl. Tabelle 2) zeigen die größten Meßwertstreuungen, darüber hinaus ist kein Einfluß der Schwinggeschwindigkeit zu erkennen⁺⁾ .

⁺⁾ Nach DIN 4150 dient die Schwinggeschwindigkeit zur Beurteilung der Schadenswahrscheinlichkeit bei resonanznah dynamisch beanspruchten Bauteilen. Daher war auch hier ein maßgeblicher Einfluß der Schwinggeschwindigkeit für möglich gehalten worden.

- Nur bei dem mit einer Schwingfrequenz von 16 Hz beanspruchten Balken 4 liegen die Biegezugfestigkeiten deutlich niedriger als die Druckfestigkeiten (jeweils bei Bezug auf die Vergleichswerte unbeanspruchter Prüflinge).
- Mit der Rißentstehung im Betonalter von 4 ... 10 Stunden ist die Biegebeanspruchung der zwischen den Rissen liegenden Betonabschnitte in einen Rüttelvorgang wie bei einer Nachverdichtung übergegangen, eine Festigkeitssteigerung ist jedoch nicht zu erkennen.

Die - in Anlage 14 nicht eingezeichnete - Trockenrohdichte der Balkenausschnitte variiert zwischen dem 0,92-fachen und 1,01-fachen des Wertes der unbeanspruchten Vergleichskörper und ist mit den Druckfestigkeiten gut korreliert.

Bei dem bewehrten, schwingbeanspruchten Balken 7 war die Beton-Druckfestigkeit im Auflagerbereich gegenüber dem unbeanspruchten erhärteten Balken 8 erhöht, und zwar je nach Schlankheitsgrad der Prüfkörper um ca. 2 % (Prismen mit Höhe 15 cm, Druckfläche $20 \times 20 \text{ cm}^2$) bzw. um ca. 13 % (Prismen mit Höhe 20 cm, Druckfläche $15 \times 15 \text{ cm}^2$). Gegenüber der auf das Prüfalter von 24 Wochen extrapolierten 28-Tage-Würfelfestigkeit besteht jedoch eine Differenz von etwa -10 ... -40 % je nach Probengeometrie und Beanspruchung während der Beton-erhärtung.

Insgesamt muß der Schluß gezogen werden, daß bei den vorliegenden Untersuchungen bei allen Balken - unabhängig von der Schwingbeanspruchung - deutliche Festigkeitsunterschiede gegenüber Gütewürfeln bestehen, obwohl auf eine in jeder Beziehung gleiche Behandlung größte Sorgfalt verwendet wurde. Demgegenüber sind die Einflüsse einer Erschütterungseinwirkung auf den jungen Beton - beurteilt anhand der Festigkeitsvariation zwischen Balkenmitte und Auflager - vernachlässigbar.

4.3.3. Tragverhalten bewehrter Balken

Die Traglasten der beiden bewehrten Balken betrugen übereinstimmend ca. 20 kN. Die Unterschiede in den Durchbiegungen (siehe Anlage 15) erklären sich zumindest teilweise dadurch, daß die bei der Schwingbeanspruchung von Balken 7 in der Umgebung der Mitte entstandenen Risse bei geringen Lasten überdrückt werden; oberhalb etwa 7,5 kN ist die lastabhängige Zunahme der Durchbiegungen bei beiden Balken etwa gleich.

Die Dehnungen der Zugbewehrung beider Balken unterscheiden sich nicht signifikant, die mittleren Rißabstände im Bereich außerhalb der Balkenmitte sind bei Balken 7 deutlich größer, vergl. nachfolgende Tabelle 4.

Abstand von Balkenmitte in cm	Anzahl der Risse bei	
	Balken 7 (beansprucht)	Balken 8 (unbeansprucht)
0...25	7	9
25...50	5	6
50...75	2	4
75...100	4	6
100...125	2	5
125...150	2	-

Tabelle 4: Rißverteilung bei der Prüfung der beiden bewehrten Balken

Die Meßwerte der Stahlstauchung in der Druckzone bei 1/4 (s. Anlage 15) zeigen große Unterschiede sowohl zwischen den beiden Meßstellen bei Balken 7 als auch im Vergleich zum ungestört erhärteten Balken 8. Die relativ großen Stahlstauchungen bei Lasten von 2,5 kN und 5 kN sind auf das Überdrücken der o.g. Risse zurückzuführen. Oberhalb von 2,5 bzw. 5 kN wird offenbar der Verbundwiderstand des zwischen 1/4 und dem Auflager liegenden Stahlabschnittes überwunden: die Stahlstauchung nimmt stark ab, gleichzeitig tritt am freien Ende des jeweiligen Stabes eine große Gleitung auf.

Insgesamt wurden bei 7 Balken Gleitwege der Längsbewehrung zwischen 0,018 mm und 0,058 mm (Zugzone) bzw. zwischen 0,57 mm und 0,90 mm (Druckzone) gemessen, während bei Balken 8 Werte von 0,004 mm nirgends überschritten wurden (siehe Anlage 15). Der durch die Schwingbeanspruchung stärker gestörte Verbund der oberen Bewehrungslage (vergl. Tabelle 3) versagt bereichsweise offenbar völlig, während die Zugbewehrung, wenn auch nach deutlichen Gleitungen, einen ausreichenden Kraftschluß entwickelt.

4.4. Vergleich mit früheren Untersuchungen

Die wichtigsten Versuchsparameter und Ergebnisse der früher durchgeführten Untersuchungen /3/4/ sind in den Anlagen 16 und 17 stichwortartig zusammengestellt.

Damals wurden ausschließlich bewehrte Balken hergestellt, deren für das Betongefüge charakteristische Festigkeitseigenschaften durch eine Schwingbeanspruchung mit $\epsilon_{bmax} \leq 0,19 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ nicht nachweisbar gemindert wurden, während bei $\epsilon_{bmax} = 0,37 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ Querrisse auftraten sowie teilweise schwere Gefüge- und Verbundschäden.

Damit in Übereinstimmung steht die jetzt am ebenfalls schwach bewehrten Balken 7 ermittelte Beton- und Rißdehnung von $\epsilon_{bmax} \leq 0,34 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$; ähnlich schwere Gefügeschäden wurden allerdings nicht beobachtet.

Ein Vergleich mit den unbewehrten Balken dieser Versuchsserie ist naturgemäß nur bedingt möglich. Die Bruchdehnung des unbewehrten Betons lag bei $\epsilon_{bmax} \leq 0,07 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$, die Rißbildung verhinderte eine weitere Biegebeanspruchung der Balkenmitte.

5. Zusammenfassung und Untersuchungsergebnisse

Das Ziel der hier beschriebenen Versuche war, den Einfluß einer anfänglichen dynamischen Beanspruchung auf die späteren Eigenschaften des reinen Betons sowie des Verbundes zwischen Stahl und Beton zu ermitteln.

Für die Verbunduntersuchungen wurden 54 würfelförmige Prüfkörper (Kantenlänge 20 cm) mit je einem einzelnen mittig einbetonierten Rippenstahl BSt 420/500 RK hergestellt. Während der Betonerhärtung wurde der Stahl im umgebenden Beton periodisch bewegt, die Parameter dieser Schwingbeanspruchung waren

Bewegungsamplitude	0,03 ... 0,3 mm
Frequenz	3 ... 32 Hz
Bewegungsrichtung	parallel oder senkrecht zur Längsachse des Stahles
Dauer	2 ... 6 Stunden innerhalb der ersten 6 1/4 Stunden nach Mischbeginn

Die Qualität des entstandenen Verbundes wurde anhand der bei Ausziehversuchen gemessenen Ausziehungskraft-Schlupf-Kurven beurteilt.

Für die Betonuntersuchungen wurden sechs unbewehrte Balken mit den Abmessungen $3,50 \times 0,20 \times 0,20 \text{ m}^3$ hergestellt und in einer biegesteifen, an den Ecken beweglich aufgelagerten Schalung (Auflagerabstand 3,20 m) zu Biegeschwingungen angeregt. Die Beanspruchungsparameter waren

Schwingamplitude	0,4 ... 3,2 mm in Balkenmitte
Frequenz	0,3 ... 16 Hz
Dauer	(11...) 24 Stunden ab Einfüllen des Betons

Nach 21 Tagen wurden Probekörper für Druck- und Biegezugfestigkeit aus der Balkenoberseite herausgeschnitten und am 28. Tage geprüft.

Von zwei schwach bewehrten Balken (Abmessungen $3,40 \times 0,15 \times 0,20 \text{ m}^3$) wurde der eine nach dem Betonieren zu Biegeschwingungen angeregt:

Schwingamplitude	2,5 mm in Balkenmitte
Frequenz	8 Hz
Dauer	8 Stunden ab Einfüllen des Betons,

während der andere ungestört erhärtete. Im Alter von etwa 28 Tagen wurde das Trag- und Verformungsverhalten beider Balken unter einer mittig aufgebrachten Einzellast geprüft.

Die wesentlichen Untersuchungsergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden; vergl. dazu insbesondere

- Anlage 3: Bezogene Verbundspannungen als Funktion des Gleitweges, anfängliche Beanspruchungsgrößen als Parameter
- Anlage 5: Verbundbeiwerte in Abhängigkeit vom Beanspruchungszeitraum
- Anlage 14: Verlauf der Beton-Druck- und Biegezugfestigkeit unbewehrter Balken längs der Balkenachse
- Anlage 15: Trag- und Verformungsverhalten der bewehrten Balken:

Axiale Bewegungen der Bewehrung im Frischbeton führen zum Verlust des Haftverbundes, wenn sie über den Zeitpunkt des Erstarrungsendes des Zements⁺⁾ andauern oder erst danach einsetzen. Der Stahl bleibt im erhärteten Beton um das Maß seines anfänglichen Bewegungshubes verschieblich (s. Anlage 3).

Dieser Effekt tritt schon bei kleinsten Bewegungen auf (versuchstechnisch bedingte Minimalamplitude 0,03 mm), ist also in der Baupraxis kaum mit Sicherheit auszuschließen. Auswirkungen auf das Bauteil-Tragverhalten sind so lange nicht zu erwarten, wie der Verlust des Haftverbundes lokal begrenzt bleibt und die Bewegungsamplituden nicht so groß werden, daß sie die maximal übertragbaren Verbundspannungen mindern (vergl. Anlagen 3 und 5).

⁺⁾ bestimmt nach DIN 488 Teil 3

Schwingbewegungen der Bewehrung, die vor dem Zeitpunkt des Erstarrungsendes einwirken, führen zu einer wesentlichen Verbesserung des Verbundes (vergl. Anlagen 3 und 5).

Die Forderung der DIN 1045, Abschnitt 10.3., Beton gegen Schwingungen und Erschütterungen zu schützen, sofern diese die Verbundwirkung gefährden können, betrifft demnach nur den Zeitraum nach Erstarrungsende des Zements (i.a. 2 ... 4 Stunden nach Mischbeginn).

Vorversuche mit dynamischer Beanspruchung der frisch einbetonierten Bewehrung in Querrichtung haben die Möglichkeit entsprechender Verbundbeeinflussungen aufgezeigt, weiterführende Untersuchungen - vor allem in Hinblick auf die praktischen Gegebenheiten bei der Gleitschalungsbauweise - erscheinen erforderlich.

Eine Erschütterungs- oder Schwingungseinwirkung auf biegebeanspruchte Bauteile (Balken) führt, bei Bezug auf den unbeanspruchten Beton über den Auflagern, zu keiner nennenswerten Beeinflussung der Druck- und Biegezugfestigkeiten des reinen Betons. Gegenüber der Festigkeit gleich behandelter Gütewürfel können dagegen beträchtliche Abweichungen auftreten (s. Anlage 14).

Die dynamische Bruchdehnung unbewehrten jungen Betons durchläuft im Alter von 4 ... 10 Stunden ein Minimum mit $\epsilon_{bmax} \approx 0,07 \text{ ‰}$ in Übereinstimmung mit den Ergebnissen statischer Zugversuche. Durch eine Bewehrung kann die Reißgefahr wesentlich vermindert werden, ein entsprechender Versuch erbrachte einen Wert $\epsilon_{bmax} < 0,34 \text{ ‰}$.

Das Zusammenwirken der aufgeführten Einflüsse wurde an einem bewehrten Balken untersucht, der während der Betonerhärtung einer Schwingbeanspruchung ausgesetzt war. Dabei entstanden starke Verbundschäden im Bereich der Auflager (Ort maximaler Bewegungsamplitude der Bewehrung), bei Belastung in Balkenmitte waren jedoch die Verformungen nur geringfügig größer als bei einem ungestört erhärteten Vergleichsbalken, die Traglast war unverändert (s. Anlage 15).

Braunschweig, den 19.10.1978

L i t e r a t u r

- /1/ Back, G. Der Einfluß von Erschütterungen und ähnlichen Störungen auf Beton während seines Erstarrens und seiner anfänglichen Erhärtung. Die Bauwirtschaft (1961), Heft 11, Seite 278...281.
- /2/ Tussing, F. und Pahde, W. Herstellung einer Stahlbeton-Fahrbahnplatte unter dem Einfluß von Erschütterungen und Durchbiegungen. Beton- und Stahlbetonbau (1967), Heft 1, S. 15...21.
- /3/ Steinert, J. Untersuchungen über den Einfluß von Erschütterungen auf die Festigkeit und die Haftung von Beton, Abschlußbericht zum gleichnamigen Forschungsauftrag, 1969
- /4/ Steinert, J. Untersuchung des Einflusses von Erschütterungen auf den Verbund von Bewehrungsstahl und Beton in Stahlbetonbauteilen, Abschlußbericht zum gleichnamigen Forschungsauftrag, 1973
- /5/ C.E.B., F.I.P. Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton, Rédaction au 30. Juni 1969
- /6/ Soretz, S. Versuche über den Einfluß der Kornzusammensetzung des Betons auf den Verbund, Teil 2 Beton- und Stahlbetonbau (1967), Heft 5, S. 121 - 127
- /7/ Weigler, H. und Karl, S. Junger Beton, Teil 1 Betonwerk + Fertigteil-TEchnik (1974), Heft 6, S. 392 - 401
- /8/ Hilsdorf, H. und Finsterwalter, K. Untersuchung über den Einfluß einer Nachverdichtung und eines Anstriches auf Festigkeit, Kriechen und Schwinden von Beton Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (1966), Heft 184

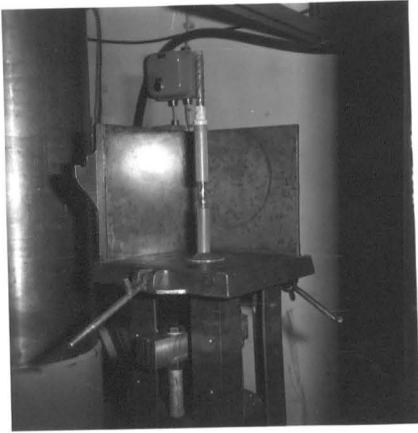


Bild 1

Rippentorstahl mit übergeschobenen
Kunststoffhülsen zur Begrenzung
der Verbundlänge,
Würfelform teilweise montiert

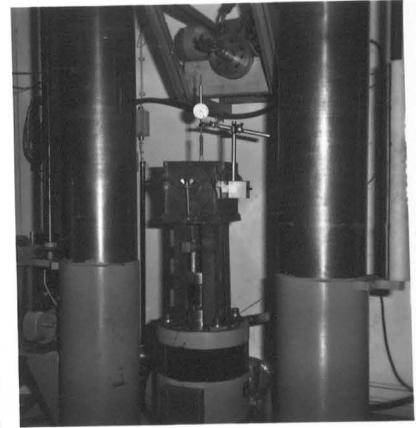


Bild 2

Hydraulik-Zylinder mit
montiertem Versuchsaufbau
für axiale Bewegung des
Stahls



Bild 3

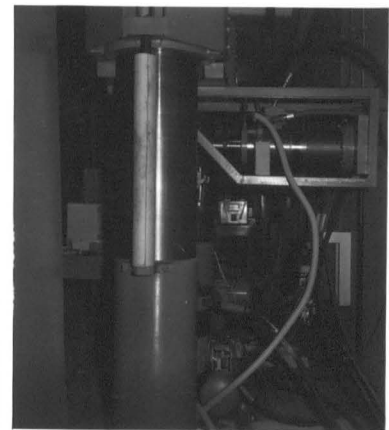


Bild 4

Versuchsaufbau für transversale Bewegung des Stahls
mit horizontal liegendem Hydraulik-Zylinder

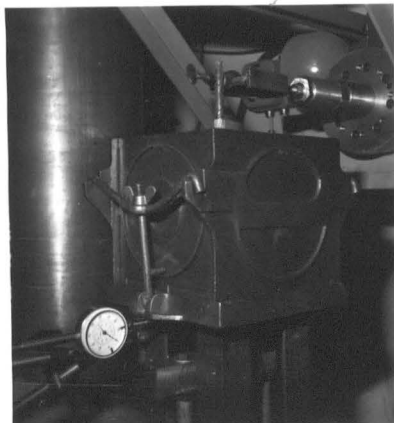


Bild 5

Ankopplung des oberen Stabendes
an den horizontalen Hydraulik-
Zylinder,
Meßuhr zur Kontrolle der
Schwingamplitude

Anlage 2: Betonrezeptur für Verbundversuche

Für eine Mischung (ca. 8 l) wurden verwendet:

Zuschlag: Größtkorn 16 mm
Sieblinie (s.u.) im günstigen Bereich nach DIN 1045 14 050 g

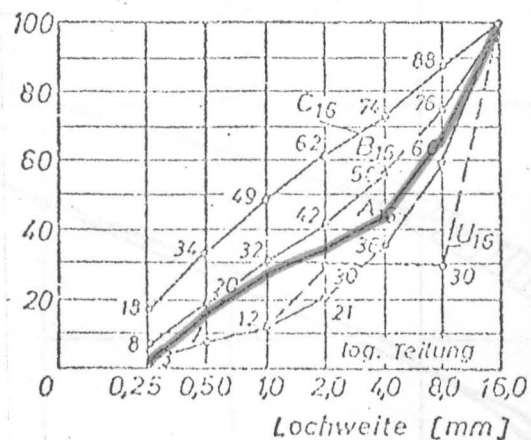
Zement: PZ 450 F / PZ 550
(bei Versuchen mit Prüfung nach 28 Tagen teilweise PZ 350 F) 3 150 g

Wasser (gesamt): ca. 1 800 g

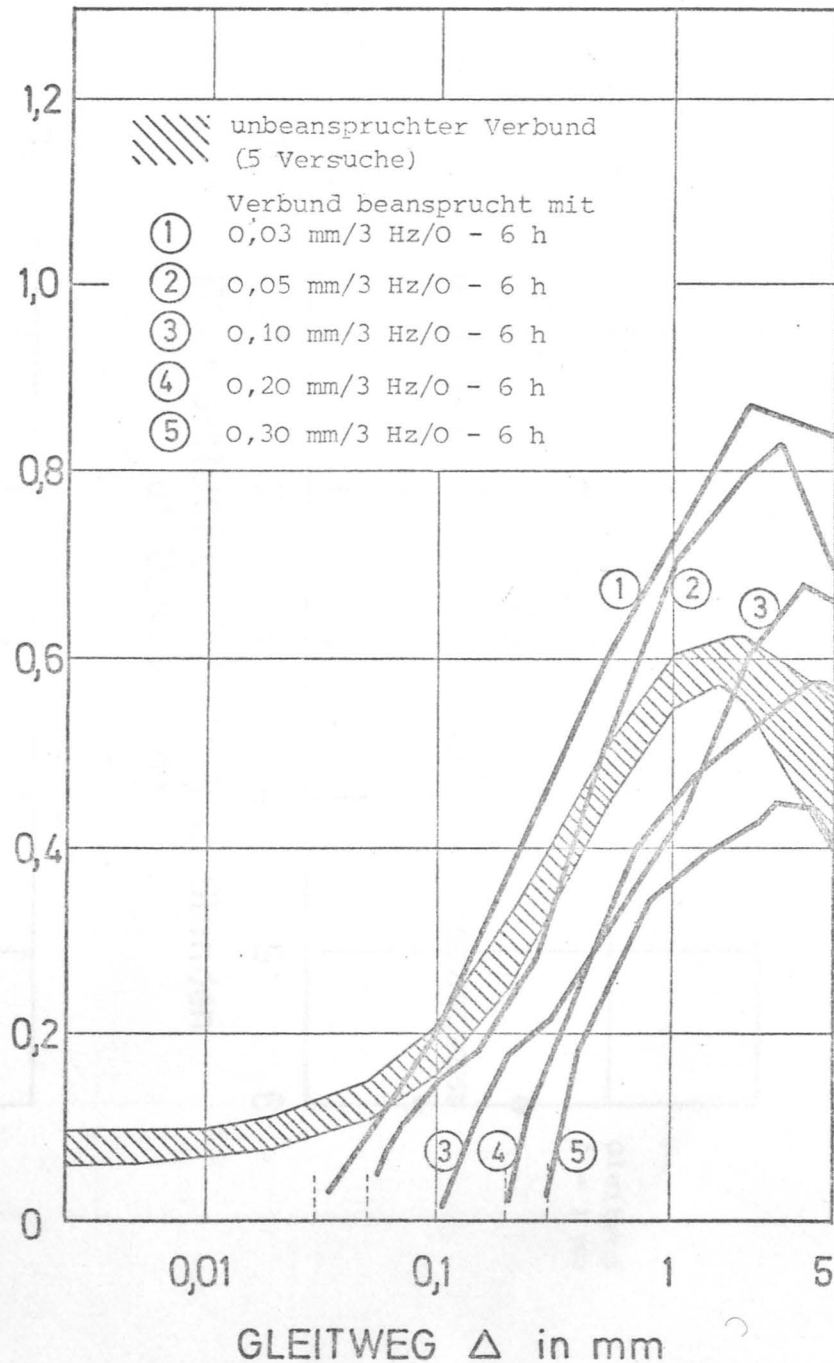
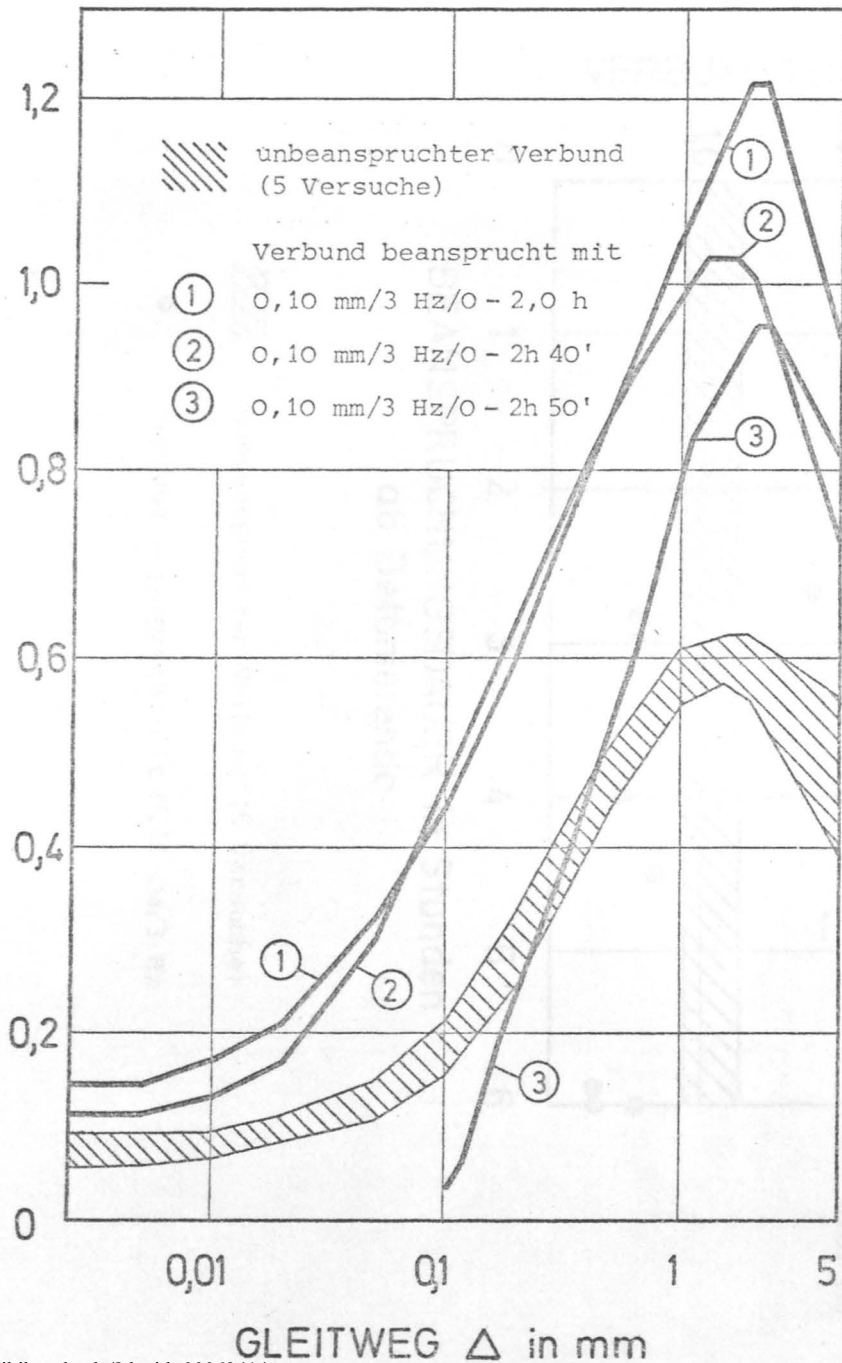
$\frac{W}{Z}$ -Wert: 0,55...0,60

Ausbreitmaß: 36 ... 39 cm

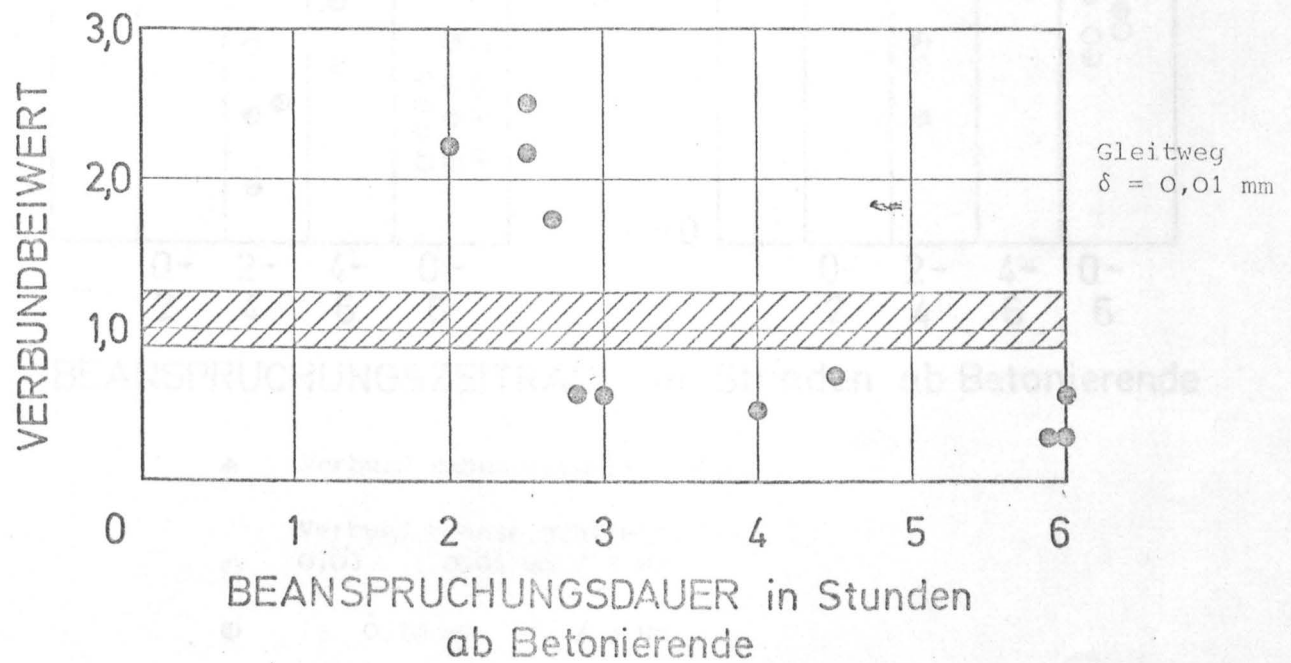
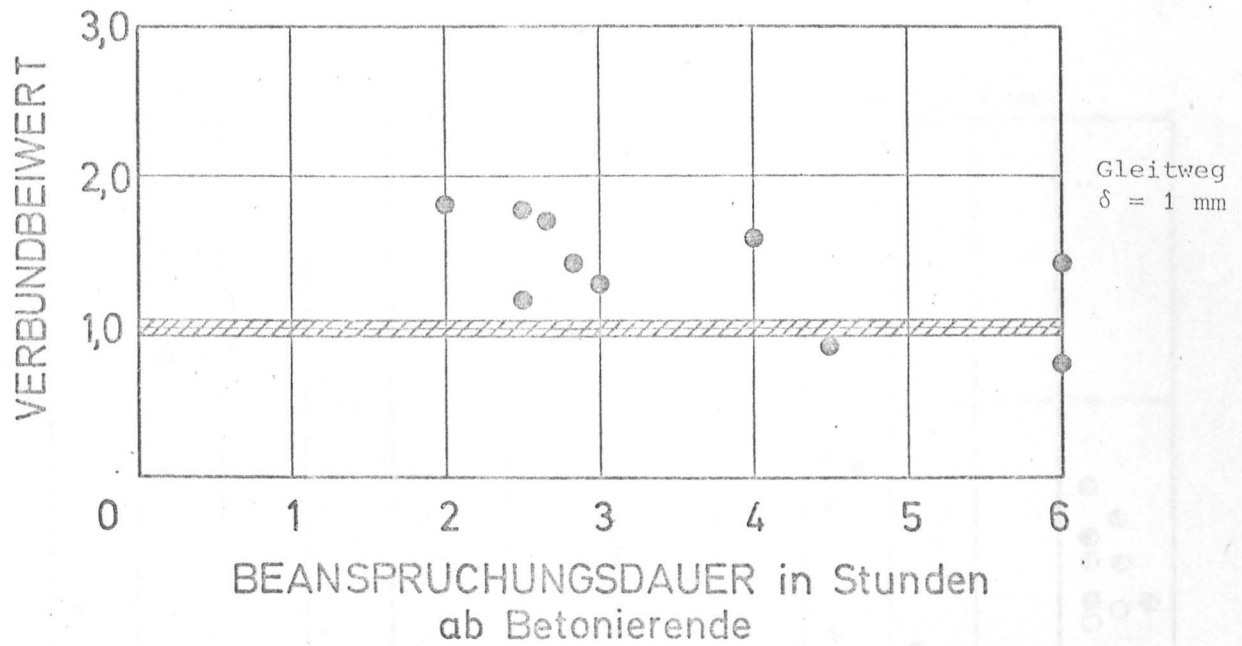
Druckfestigkeit nach 1 Tag: $\beta_{w1} \approx 16...20 \text{ N/mm}^2$
nach 28 Tagen: $\beta_{w28} = 47,0...54,7 \text{ N/mm}^2$



Sieblinie der verwendeten Zuschläge



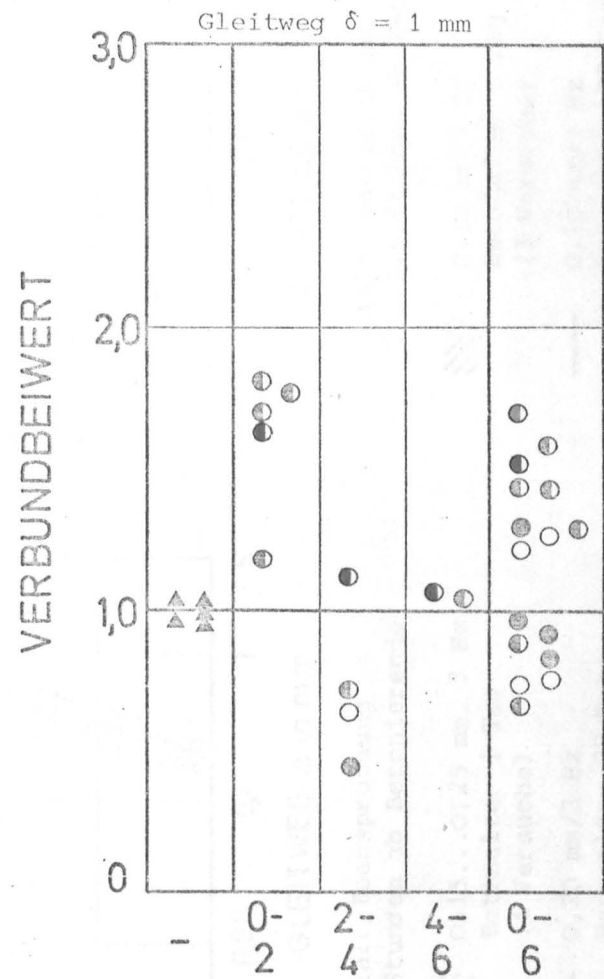
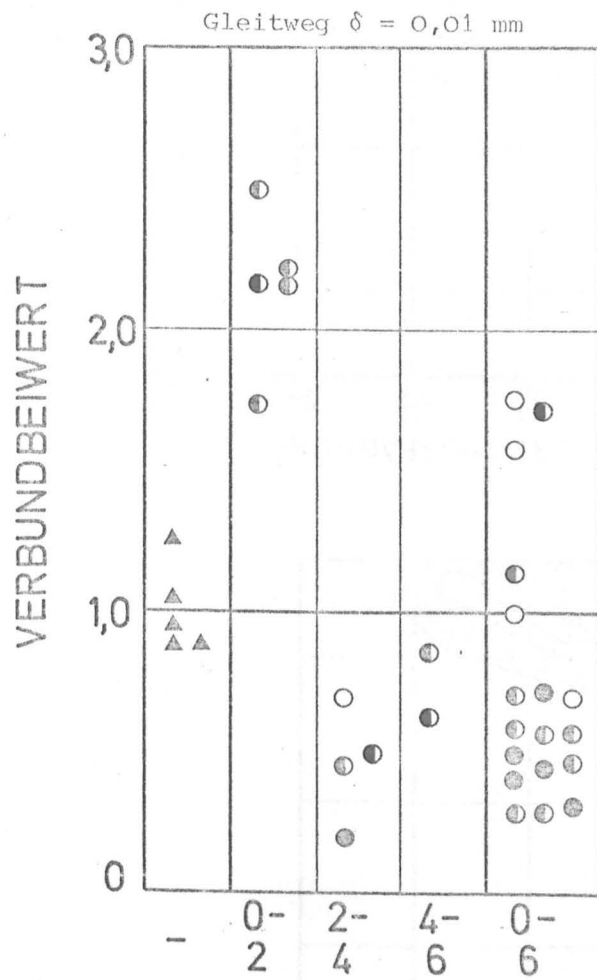
Anlage 4: Verbundbeiwert in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer
ab Betonierende



unbeanspruchter Verbund (5 Versuche)



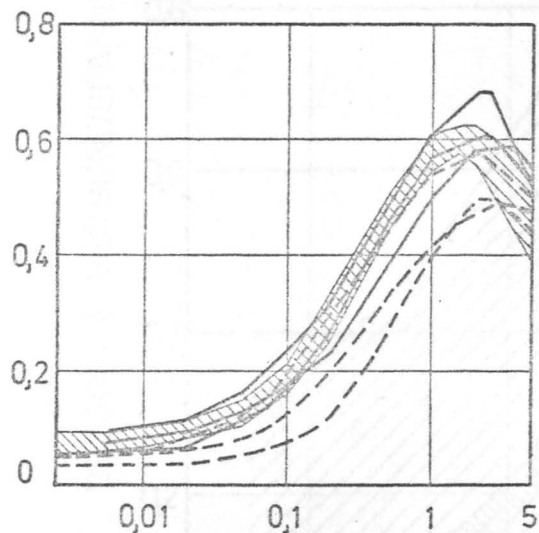
Verbund beansprucht mit $0,10 \text{ mm/3 Hz}$



BEANSPRUCHUNGSZEITRAUM in Stunden ab Betonierende

- ▲ Verbund unbeansprucht
- Verbund beansprucht mit:
- 0,03 ... 0,05 mm / 3 Hz
- 0,10 mm / 3 Hz
- 0,20 ... 0,30 mm / 3 Hz
- 0,10 mm / 16 Hz
- 0,10 mm / 32 Hz

BEZOGENE VERBUNDSPANNUNG

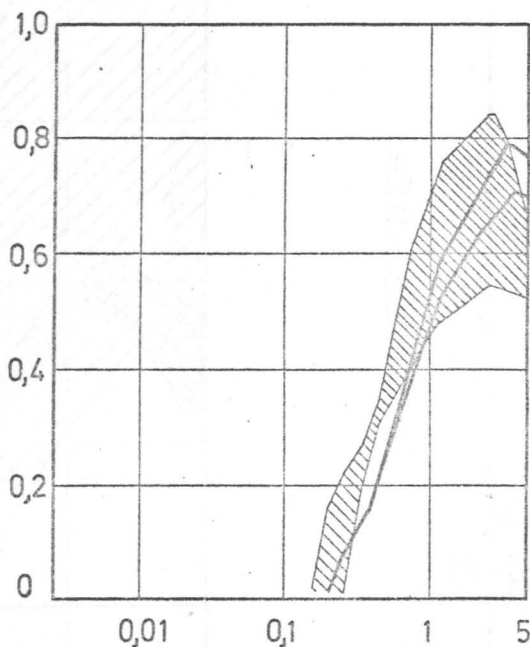


GLEITWEG Δ in mm

Verbund unbeansprucht

- Betonalter 1 Tag, gestochert (5 Versuche)
- Betonalter 28 Tage, gestochert
- Betonalter 28 Tage, gerüttelt

BEZOGENE VERBUNDSPANNUNG

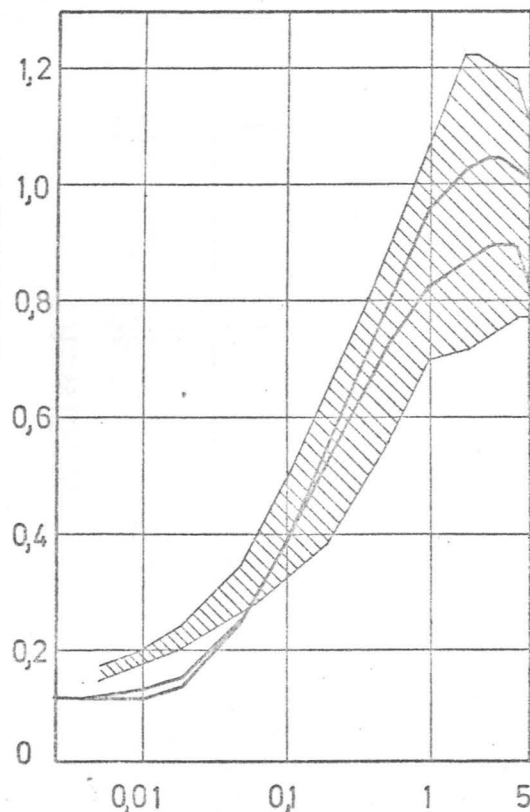


GLEITWEG Δ in mm

Axiale Beanspruchung
6 Stunden ab Betonierende

- 0,15...0,25 mm, 3 Hz
Betonalter 1 Tag (4 Versuche)
- 0,20 mm/3 Hz
Betonalter 28 Tage

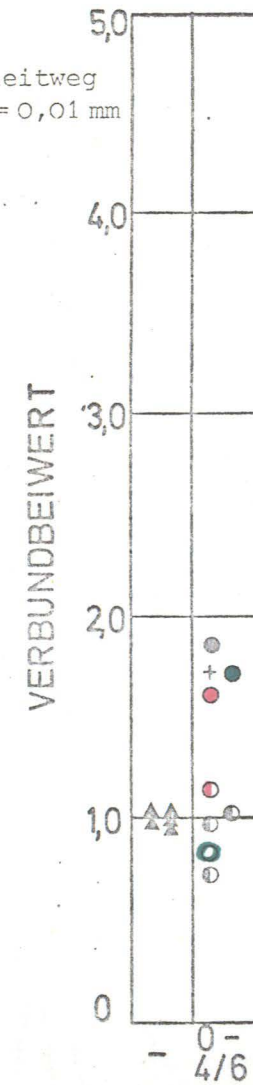
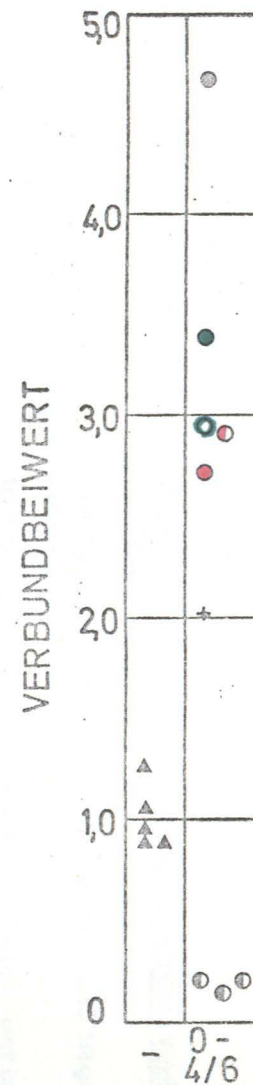
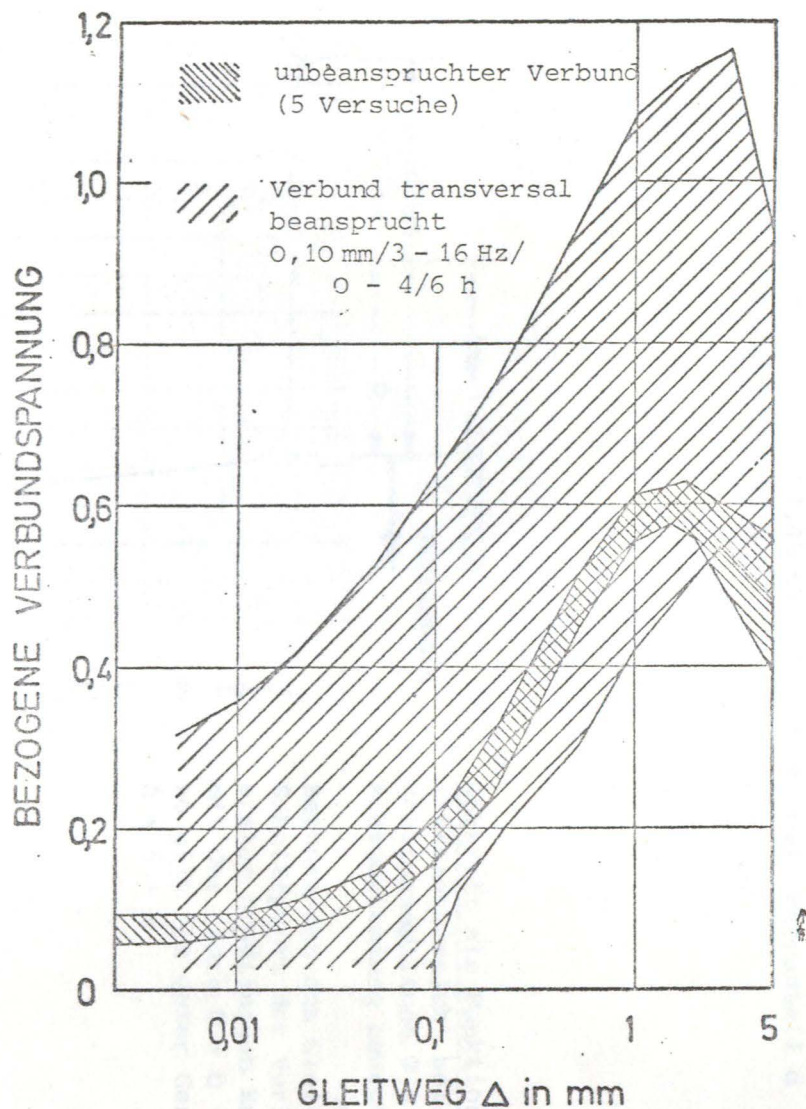
BEZOGENE VERBUNDSPANNUNG



GLEITWEG Δ in mm

Axiale Beanspruchung
2...2,5 Stunden ab Betonierende

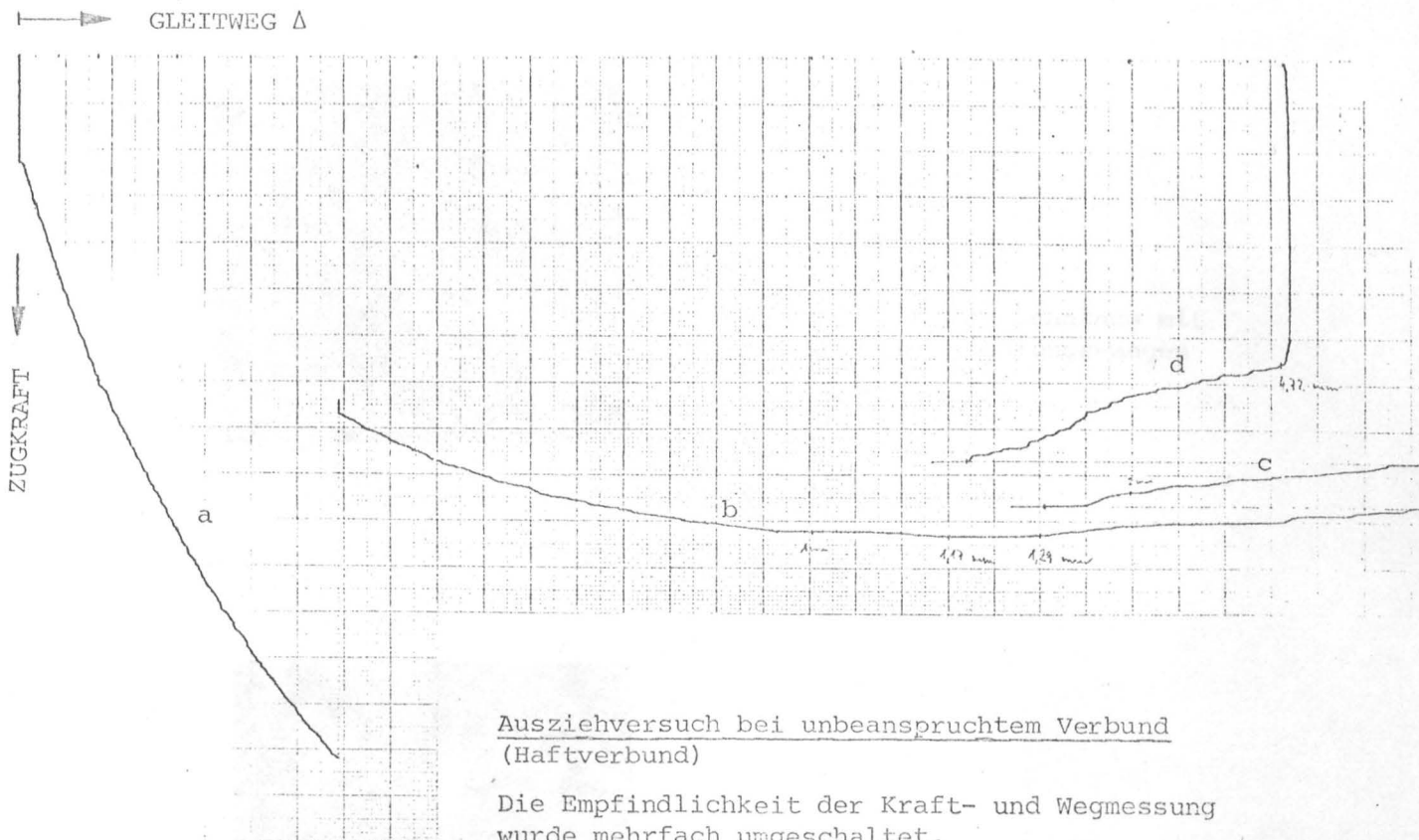
- 0,10 mm/3 Hz
Betonalter 1 Tag (3 Versuche)
- 0,10 mm/3 Hz
Betonalter 28 Tage



- ▲ unbeansprucht, Ausbreitmaß 36...39 cm
- + Ausbreitmaß ca. 37 cm, 3 Hz, gerüttelt

- Ausbreitmaß ca. 35 cm, 8 Hz
- Ausbreitmaß ca. 37 cm, 3 Hz / 16 Hz
- Ausbreitmaß ca. 40 cm, 3 Hz / 16 Hz

Anlage 8: Beispiel für eine Meßwertaufzeichnung bei den Ausziehversuchen,
Erläuterung zur Definition der Gleitwege Δ und δ

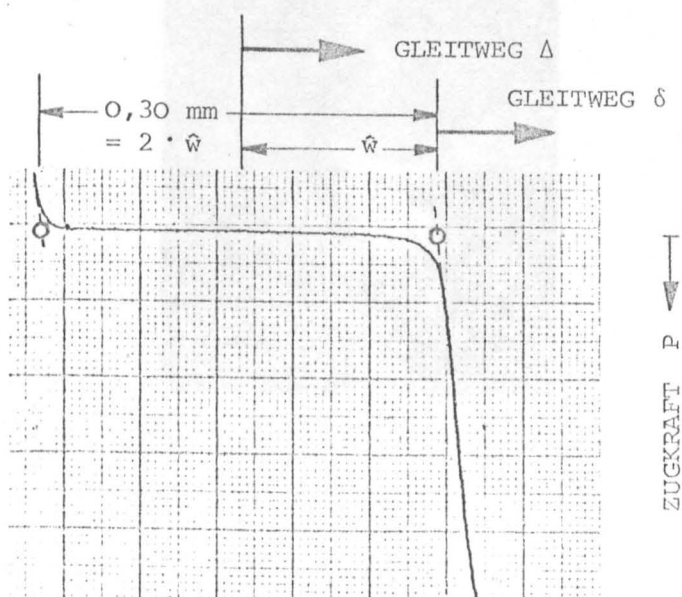


Ausziehversuch bei unbeanspruchtem Verbund
(Haftverbund)

Die Empfindlichkeit der Kraft- und Wegmessung
wurde mehrfach umgeschaltet,

10 mm in der Originalaufzeichnung entsprechen

0,74 kN / 0,058 mm	bei Kurventeil a
1,48 kN / 0,058 mm	bei Kurventeil b
1,48 kN / 0,116 mm	bei Kurventeil c
1,48 kN / 0,290 mm	bei Kurventeil d



Zugkraft als Funktion des Gleitwegs
(Anfangsbereich) bei einem mit der
Schwingamplitude $\hat{w} = 0,15$ mm in
Achsenrichtung bewegten Stahl.

Rechnet man den Gleitweg δ vom
Schnittpunkt der Verlängerung des
ersten gradlinigen Kurventeils
mit der Linie $P = 0$ ("Kraftschluß"),
so gilt mit guter Genauigkeit
 $\Delta = \delta + \hat{w}$

Anlage 9: Versuchsaufbau für die Schwingbeanspruchung der frisch
betonierten Balken



Bild 6

Fertig montierte Schalung mit
geschlitzten Schalungswangen



Bild 7

Schalungsboden (Stahlrohr) mit
ausgeschalttem Betonbalken nach
der Schwingbeanspruchung



Bild 8

Auflagerung des Schalungsbodens
auf einer Stahlrolle

Anlage 10: Betonrezeptur für Balkenversuche

Für 1 m³ Frischbeton wurden verwendet:

Zuschlag: Größtkorn 32 mm,
(Sieblinie (s.u.) im brauchbaren
Bereich nach DIN 1045 1916 kg

Zement: PZ 350 F 244 kg

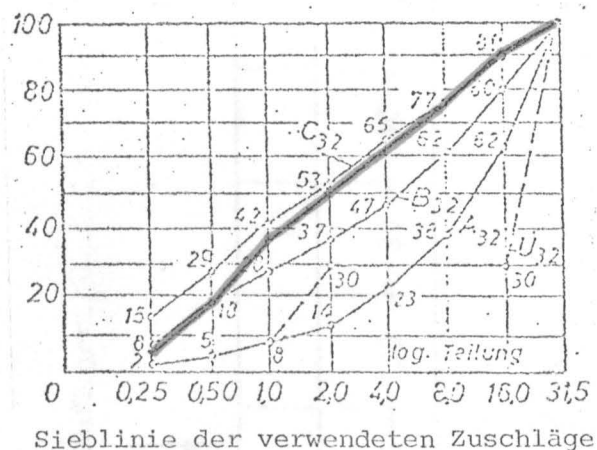
Wasser (gesamt): 203 kg

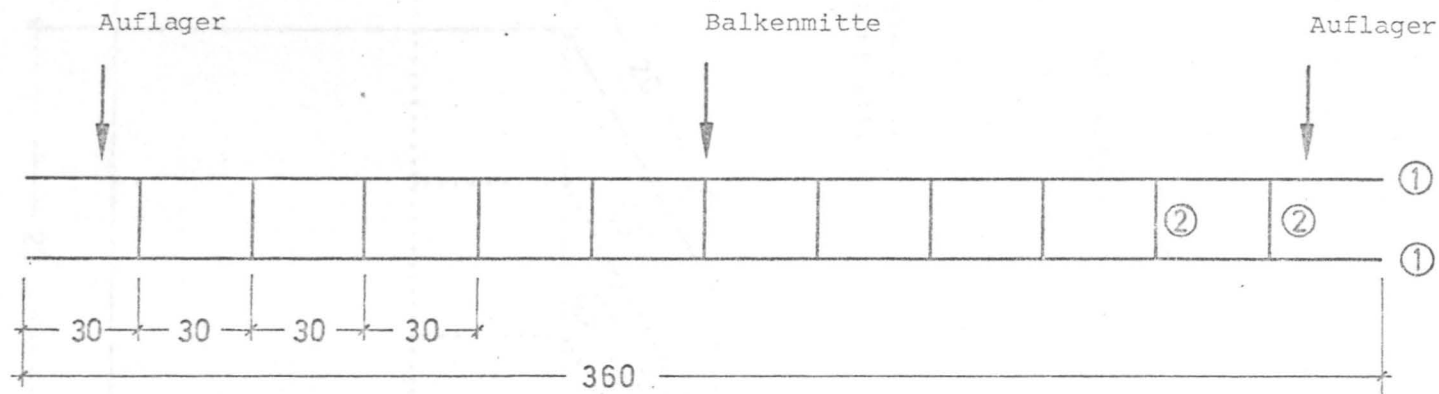
$\frac{W}{Z}$ -Wert: 0,83

Frischbetoneigenschaften:

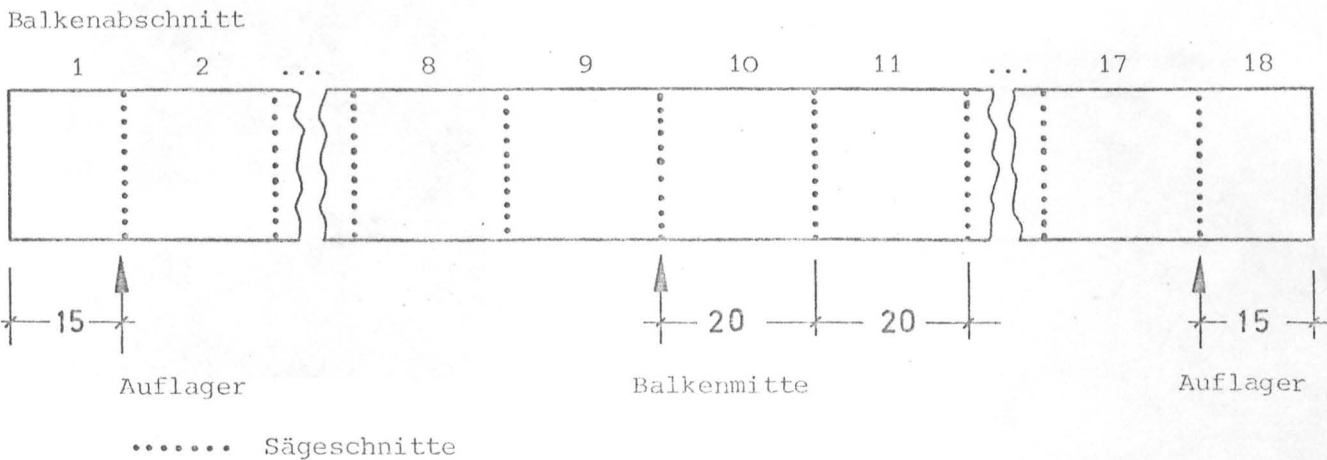
Rohdichte 2,35 kg/dm³
Ausbreitmaß 38 cm
Verdichtungsmaß ca. 4 cm

Druckfestigkeit: $\beta_{w28} = 27,5 \dots 32,5 \text{ N/mm}^2$

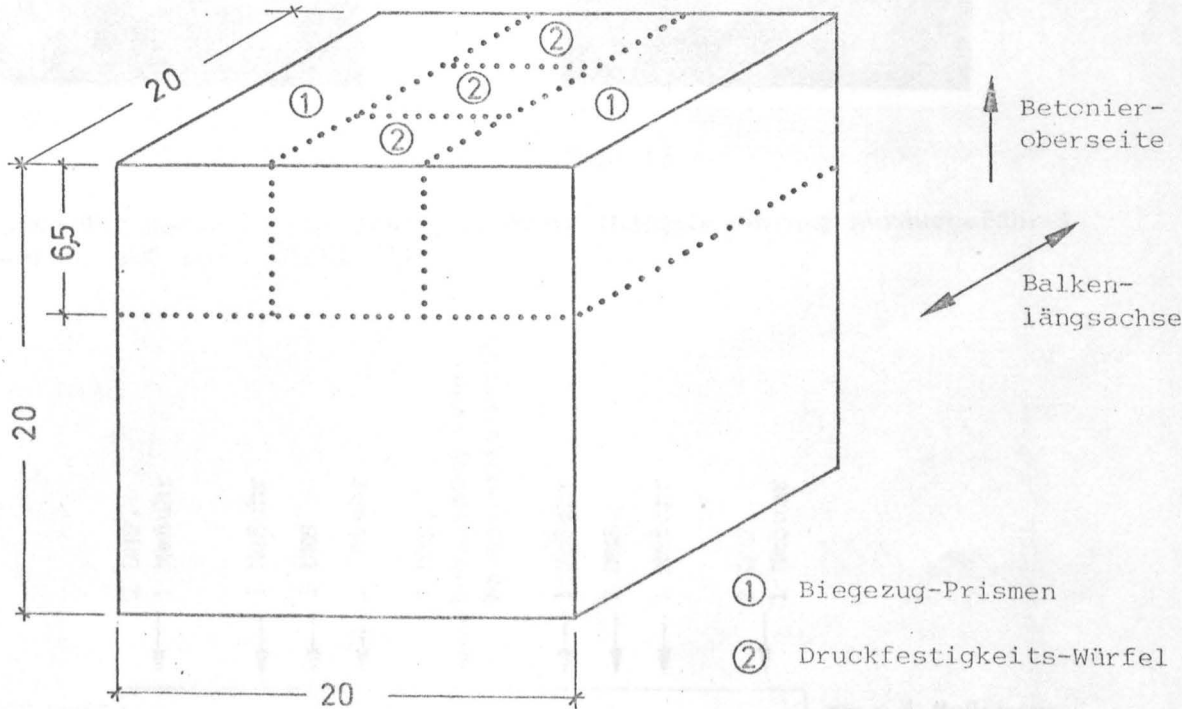




- ① 4 x BSt 420/500 RK, \varnothing 12 mm, $l = 3,60$ m
- ② 11 Bügel BSt 420/500 RK, \varnothing 8 mm, Außenabmessungen 12 x 17 cm, gegenseitiger Abstand 30 cm, Betondeckung 1,5 cm



Balkenabschnitte 2 bis 17 sowie 2 unbeanspruchte Gütewürfel wurden wie folgt weiter zerteilt:



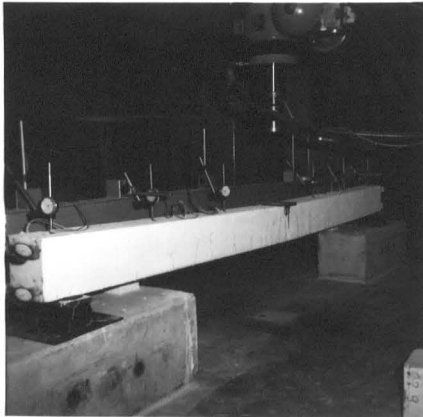


Bild 9

Versuchsaufbau mit Belastungseinrichtung, Auflager und Meßuhren zur Ermittlung der Biegelinie

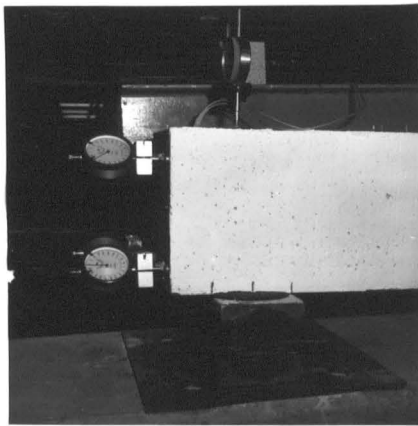


Bild 10

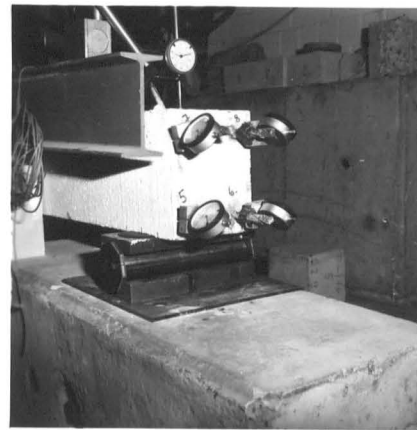
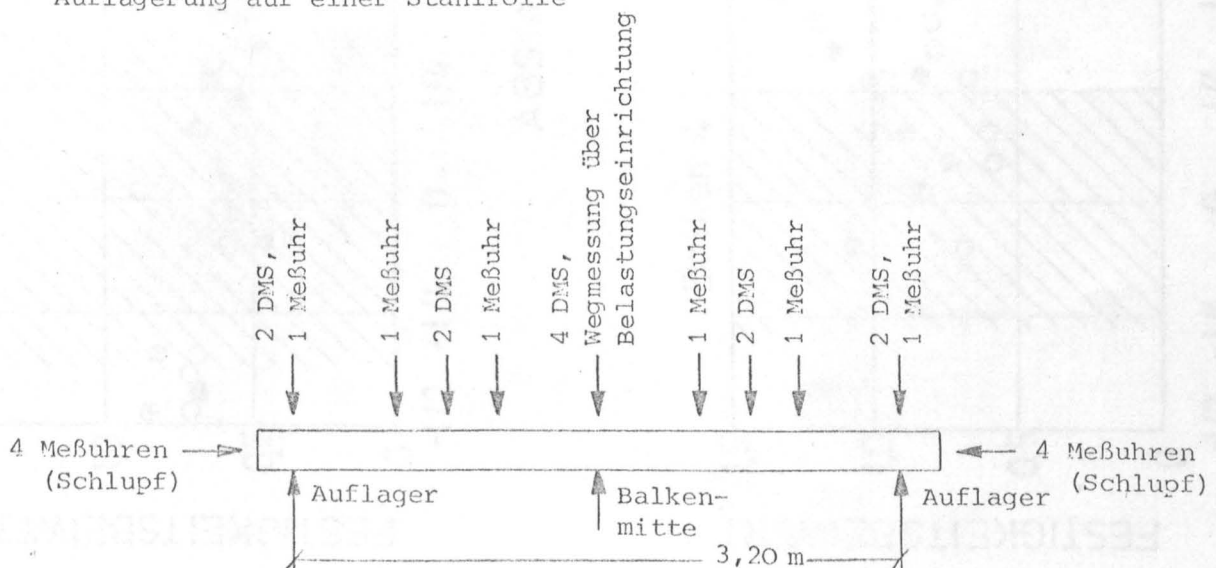
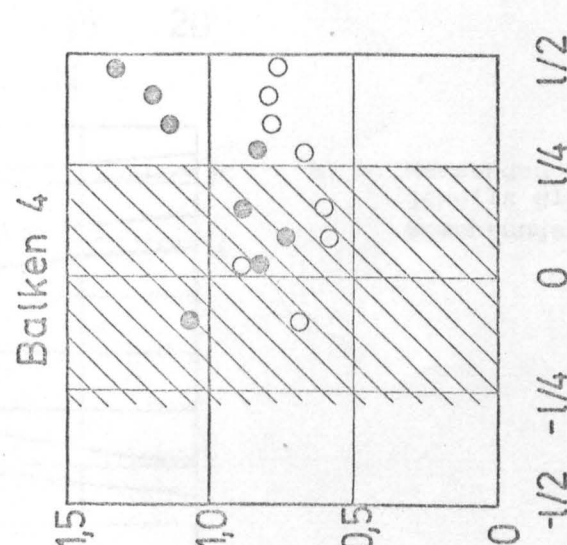
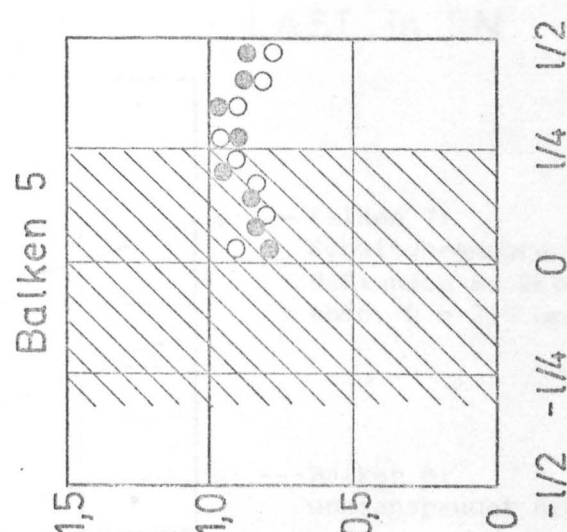
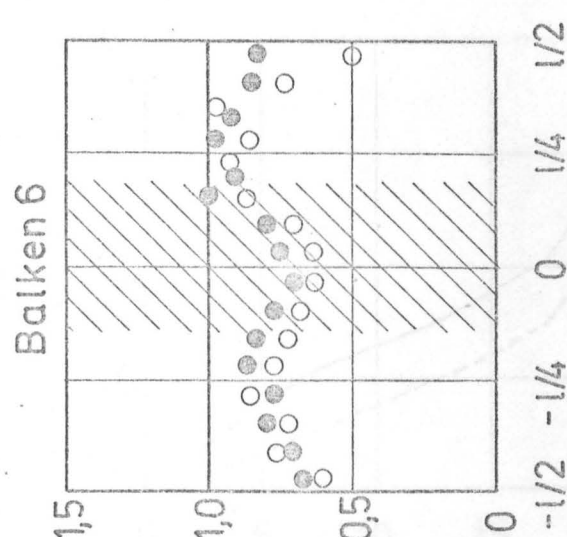
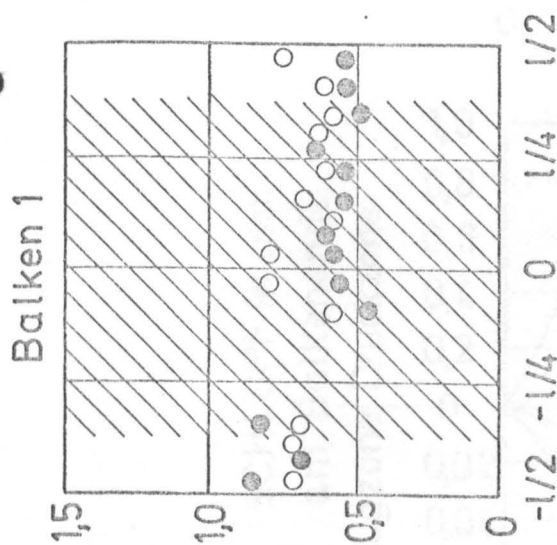
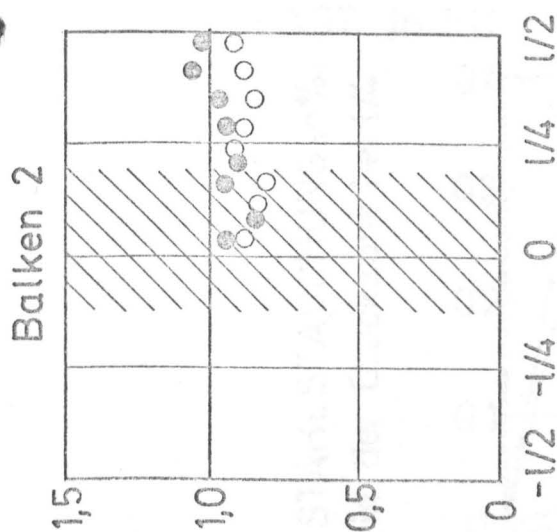
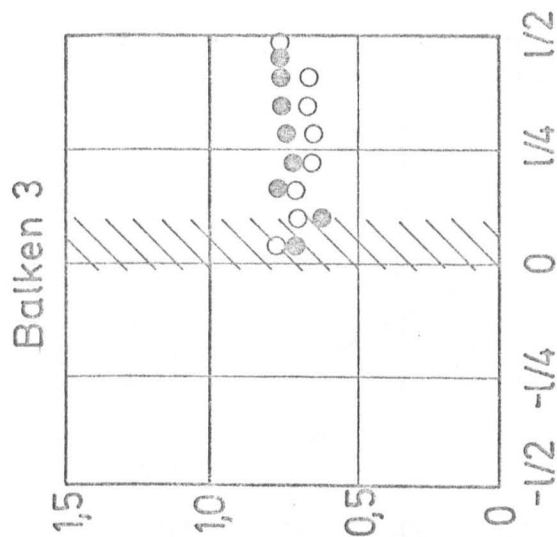


Bild 11

Anordnung der Meßuhren zur Schlupfmessung (Längsbewehrung herausgeführt), Auflagerung auf einer Stahlrolle



Anordnung der Meßuhren und Dehnmessstreifen zur Messung der Biegelinie, des Schlupfes und der Stahldehnungen

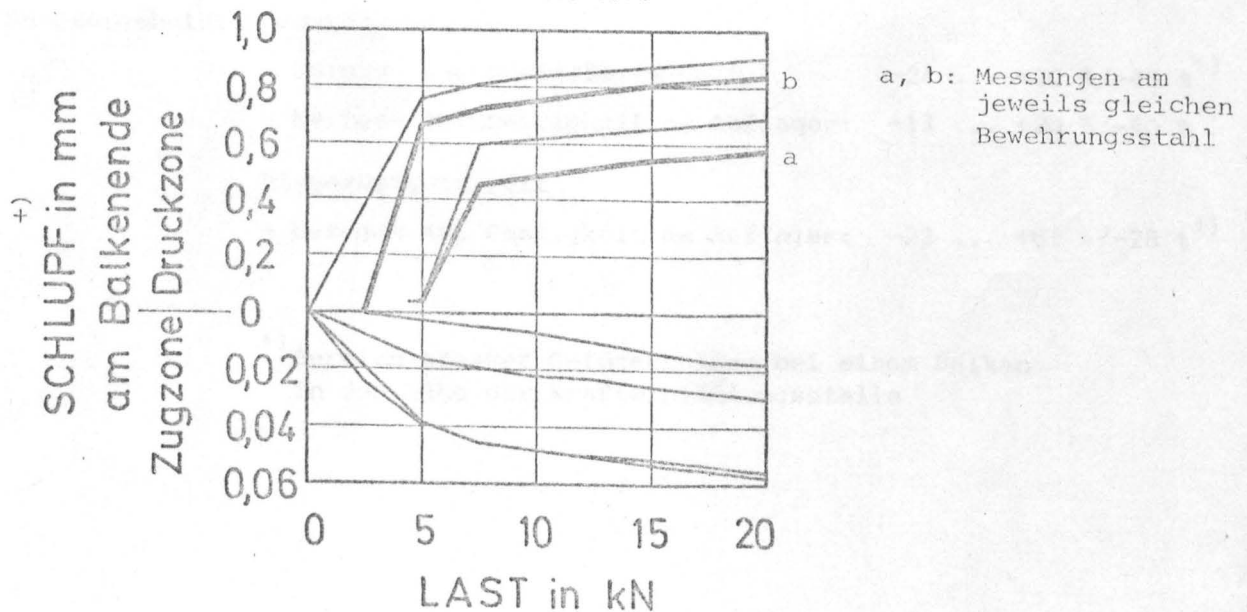
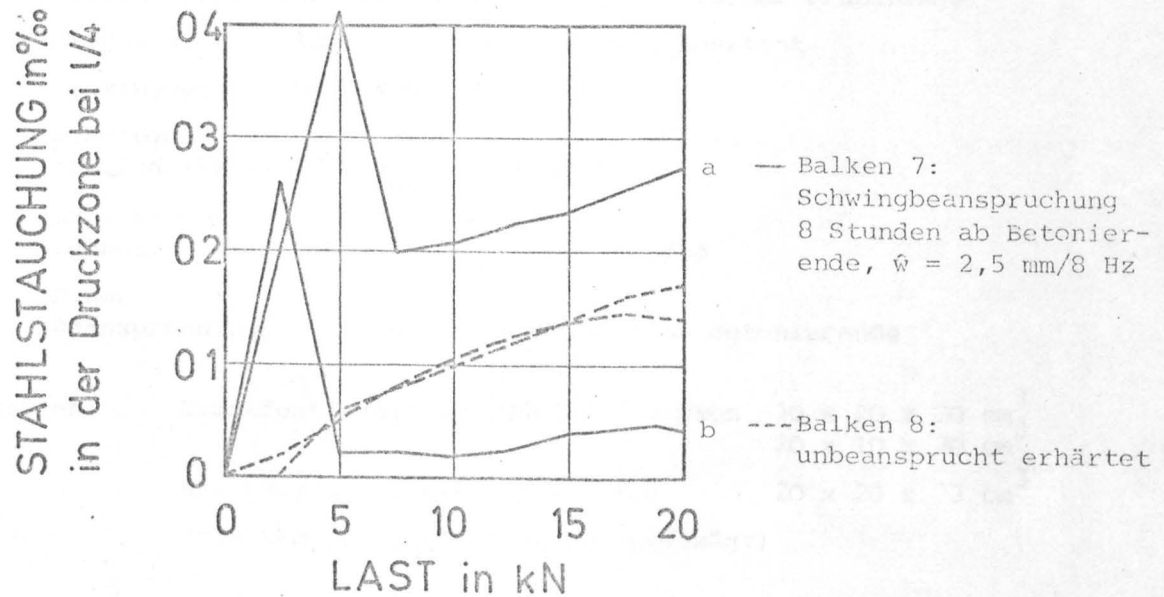
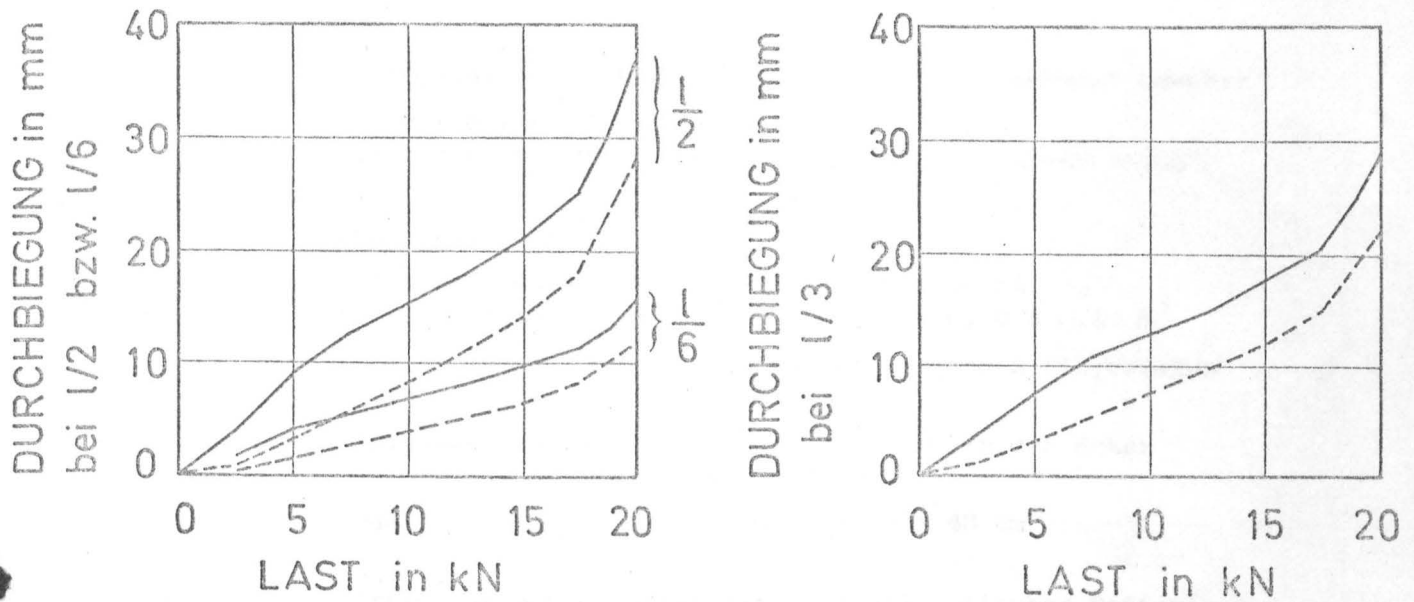


- Druckfestigkeit
 - Biegezugfestigkeit
- bezogen auf den Mittelwert unbeanspruchter erhärteter Vergleichskörper



Bereich mit Querrissen durch Schwingbeanspruchung

ABSTAND VON DER BALKENMITTE



+) unterschiedliche Ordinatenmaßstäbe für Zugzone bzw. Druckzone!
Schlupf bei dem ungestört erhärteten Balken 8 unter $0,004 \text{ mm}$.

Anlage 16: Kurzübersicht über das Forschungsvorhaben

"Untersuchungen über den Einfluß von Erschütterungen auf die Festigkeit und die Haftung von Beton" /3/

Prüfkörper: 5 Biegebalken $3,50 \times 0,20 \times 0,20 \text{ m}^3$, schwach bewehrt"

- a.) zur Untersuchung des Gefüges
- b.) zur Untersuchung der Haftung "alter - junger Beton"

Schalung: Schalungsboden

- a.) 4 Balken: Stahlträger U 200 DIN 1026 St. 33
- b.) 1 Balken: Stahlbetonbalken $3,50 \times 0,10 \times 0,20 \text{ m}^3$

Schalungswangen unabhängig von schwingenden Biegebalken

Bewehrung: Längsbewehrung St III b $4 \times \emptyset 12 \text{ mm}$ in den Ecken
Betondeckung 3 cm

Bügel St III b $\emptyset 8 \text{ mm}$; $e = 48 \text{ cm}$

Beanspruchung: mittig durch Einzellast mit servohydraulischer Prüfanlage

Frequenz: $10 \leq f \leq 20 \text{ Hz}$, jeweils konstant

Schwingweg: $0,50 \leq x_{ss} \leq 0,71 \text{ mm}$

Schwinggeschwindigkeit: $12 \leq v_{\text{eff}} \leq 23 \text{ mm/s}$

max. Beton-
dehnung: $0,022 \leq \epsilon_{\text{bmax}} \leq 0,113 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$

Dauer der
Beanspruchung: 6 ... 50 Stunden ab Betonierende

Beurteilungsgrößen: Druckfestigkeit von Würfeln/Prismen $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$
 $20 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$
Biegezugfestigkeit von Platten $20 \times 20 \times 3 \text{ cm}^3$
(Probekörper aus Balken herausgesägt)

Untersuchungsergebnis: Druckfestigkeit

- bezogen auf Würfelfestigkeit: $-24 \dots +20 \text{ }^{\circ}/-45 \text{ }^{\circ} \text{ }^{+)}$
- bezogen auf Festigkeit am Auflager: $-13 \dots +20 \text{ }^{\circ}/-40 \text{ }^{\circ} \text{ }^{+)}$

Biegezugfestigkeit

- bezogen auf Festigkeit am Auflager: $-22 \dots +61 \text{ }^{\circ}/-28 \text{ }^{\circ} \text{ }^{+)}$

$^{+)}$ Bereich starker Gefügeschäden bei einem Balken
in der Nähe der Krafteinleitungsstelle

Anlage 17: Kurzübersicht über das Forschungsvorhaben

"Untersuchung des Einflusses von Erschütterungen auf den Verbund von Bewehrungsstahl und Beton in Stahlbetonbauteilen" /4/

Prüfkörper: 8 Biegebalken $3,50 \times 0,20 \times 0,20 \text{ m}^3$, schwach bewehrt

Schalung: Schalungsboden: Stahlbetonbalken $3,50 \times 0,10 \times 0,20 \text{ m}^3$
Schalungswangen mitschwingend (am Unterbeton befestigt)

Bewehrung: Längsbewehrung St III b $4 \times \emptyset 12 \text{ mm}$ in den Ecken
Betondeckung 3 cm
Bügel St III b $\emptyset 8 \text{ mm}$, $e = 14,4 / 28,8 \text{ cm}$

Beanspruchung: mittig durch mitschwingende Prüfmaschine (Fliehkraftprinzip)
Frequenz: $8,4 \leq f \leq 15,8 \text{ Hz}$, Nachfahren der sich infolge der Betonerhärtung verändernden Resonanzfrequenz
(Möglichkeit zur Bestimmung der Zunahme des E-Moduls!)
1 Versuch mit konstanter Frequenz 5,7 Hz
Schwingweg: $0,37 \leq x_{ss} \leq 2,40 \text{ mm}$ / 1 Balken mit $x_{ss} = 11,8 \text{ mm}$
Schwinggeschwindigkeit: $23 \leq v_{eff} \leq 425 \text{ mm/s}$ / 1 Balken mit $v_{eff} = 158 \text{ mm/s}$
max. Beton-
dehnung: $0,11 \leq \epsilon_{bmax} \leq 0,19 \text{ }^\circ/\text{oo}$ / 1 Balken mit $\epsilon_{bmax} = 0,37 \text{ }^\circ/\text{oo}$
Dauer der Beanspruchung: 17 ... 46 Stunden ab Betonierende

Beurteilungsgrößen: Druckfestigkeit von Prismen $20 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$
Spaltzugfestigkeit von Prismen $20 \times (10 + 10) \times 10 \text{ cm}^3$
Haftfestigkeit von Prismen $20 \times (10 + 10) \times 10 \text{ cm}^3$
Biegezugfestigkeit von Platten $20 \times 10 \times 2,5 \text{ cm}^3$
(Probekörper aus Balken herausgesägt)

Untersuchungsergebnis: Druckfestigkeit des Aufbetons
- bezogen auf Würfelfestigkeit: $-44...+32 \text{ } \%$ / $-3...+26 \text{ } \%$
- bezogen auf Festigkeit am Auflager: $-27...+11 \text{ } \%$ / $-20...+4 \text{ } \%$
Biegezugfestigkeit des Aufbetons
- bezogen auf Festigkeit am Auflager: $-37...+31 \text{ } \%$ / $-11...+11 \text{ } \%$
Biegezugfestigkeit Aufbeton / Unterbeton
- bezogen auf Festigkeit am Auflager: $-100...+77 \text{ } \%$ / $-100...+0 \text{ } \%$
Spaltzugfestigkeit Aufbeton / Unterbeton
- bezogen auf Festigkeit am Auflager: $-15...+38 \text{ } \%$ / -
Gefüge- und Verbundschädigung bei $\epsilon_{bmax} \leq 0,19 \text{ }^\circ/\text{oo}$ nicht nachweisbar, bei $\epsilon_{bmax} = 0,37 \text{ }^\circ/\text{oo}$ sehr stark, allerdings nur in einer Balkenhälfte (dort keine Festigkeitsuntersuchungen).
+) gilt für die nach Augenschein weniger geschädigte Hälfte des am stärksten beanspruchten Balkens